DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.329 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

一种改进随机森林算法的并网逆变器开路故障诊断方法

张 明[1]，张 倩[1]，李 效[1]，叶 轩[1]，何顺帆[2]
(1.武汉纺织大学电子与电气工程学院，武汉 430200；2.中南民族大学计算机科学学院，武汉 430074)

摘要：对并网逆变器 IGBT 开路故障高效诊断有助于快速发现故障，确保并网逆变系统的稳定运行和设备安全。现有 IGBT 开路故障诊断方法存在特征提取难、诊断正确率差等问题，为此提出了一种改进随机森林算法的并网逆变器 IGBT 开路故障诊断方法。首先利用极大重叠离散小波 MODWT(maximum overlapping discrete wavelet)分解提取出三相电流信号各频带的小波能量，作为 IGBT 开路故障诊断用特征值；然后利用改进的随机森林算法识别不同类型的故障；最后对各种并网逆变器 IGBT 开路故障进行诊断实验。结果表明，相对于传统的反向传播 BP(back propagation)神经网络、支持向量机 SVM(support vector machine)等诊断方法，所提方法诊断正确率高，可适用于并网逆变器 IGBT 开路故障诊断。

关键词：并网逆变器；IGBT 开路故障；改进随机森林；极大重叠离散小波能量

Open-circuit Fault Diagnosis of Grid-tied Inverters Based on Modified Random Forest

ZHANG Ming[1], ZHANG Qian[1], LI Xiao[1], YE Xuan[1], HE Shunfan[2]
(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China;
2. College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: Efficient diagnosis of IGBT open-circuit faults in grid-tied inverters is helpful for quickly detecting the fault and ensuring the stable operation of the grid-tied inverter system and the safety of equipment. The existing IGBT open-circuit fault diagnosis methods have problems such as difficult feature extraction and poor diagnosis accuracy. On this basis, a method is proposed for IGBT open-circuit fault diagnosis of grid-tied inverter based on modified random forest. First, the wavelet packet energy of each frequency band of three-phase current signal is extracted by maximum overlapping discrete wavelet (MODWT) decomposition as the characteristic values for IGBT open-circuit fault diagnosis; Then, the modified random forest method is used to identify different types of faults; Finally, the various IGBT open-circuit faults of grid-tied inverters are diagnosed. The experimental results show that the proposed method has higher diagnosis accuracy and is suitable for IGBT open-circuit fault diagnosis of grid-tied inverters compared with the traditional diagnosis methods such as back propagation (BP) neural network and support vector machine (SVM).

Keywords: Grid-tied inverters; IGBT open-circuit fault; modified random forest; MODWT energy

随着光伏等分布式电源大规模接入电网，并网逆变器使用数量大大增加，其一旦发生故障势必影响并网逆变系统的安全稳定运行和设备安全。本体老化、过电流等原因引起的 IGBT 开路故障是并网逆变器的主要故障形式，虽然一般不会引起系统保护动作，但会造成并网逆变器带故障运行，结果往往导致更加严重的后续故障发生。因此 IGBT 开路

收稿日期：2023-02-17；**修回日期**：2023-06-18，2023-11-20；
录用日期：2023-12-13；**网络首发日期**：2024-05-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51477124，61903384)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 51477124 and 61903384

故障的早期诊断对于提高并网逆变器的运行可靠性十分重要[1-2]。

故障特征值提取和故障类型识别是并网逆变器 IGBT 开路故障诊断的关键。常见故障特征值提取算法主要有逆变器状态模型法、直接计算时域特征值法、傅里叶变换、小波(包)变换、经验模态分解 EMD(empirical mode decomposition)、希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang transform)等；故障类型识别方法主要有 BP 神经网络 BPNN(back propagation neural network)、*K* 最近邻方法 KNN(*K*-nearest neighbor)、支持向量机 SVM(support vector machine)、自编码器 AE (auto-encoder)等。文献[3]首先根据逆变器模型分析其不同工作状态，得到状态模式表，然后由所有工作状态构造出样本数据，最后采用 KNN 对开路故障类型进行判断，但其分类精度很大程度上取决于逆变器模型的精度；文献[4]采用滑动三角化处理方法直接在时域提取逆变器输出的电流信号多尺度趋势特性和数据波动成分，同时通过标注数据波动成分来降低幅值影响，然后利用多尺度趋势特性计算出故障量变的特征值，并采用回声状态网络 ESN (echo state network)实现 IGBT 开路故障的分类，但其故障特征易受电网及负载参数变化影响，导致分类性能不稳定；文献[5]采用加窗离散傅里叶变换对逆变器输出电压信号的正序对称分量进行估计，提取基本谱残差并利用 BPNN 方法实现逆变器开关元件故障检测与桥臂定位；文献[6]采用小波包变换将故障电流信号分解为若干个频带，并提取小波包能量作为故障特征向量，然后将该故障特征向量作为 SVM 的输入量，并运用交叉法验证径向基核函数，通过训练数据集得到多分类 SVM 模型，最后将随机选取的测试集输入训练好的 SVM 模型中进行分类；文献[7]利用 EMD 提取电流信号前几个本征模式分量信息作为故障特征，然后计算本征模式分量的样本熵，从而得到用于故障诊断的特征向量，最后将故障特征向量输入 BPNN 进行逆变器开路故障的分类；文献[8]采用 HHT 对三相故障电流信号进行处理，并在时频图中找到特征频带，然后提取特征频带的能量熵作为故障特征值，最后采用概率神经网络 PNN (probabilistic neural network)实现 IGBT 开路故障检测，并通过计算三相故障电流信号的均值确定故障所在桥臂；文献[9]采用大小为 24×40 的移动采样窗口，由 24 通道电压信号获得“数据带”样本，然后利用自编码器对“数据带”样本进行无监督学习，自动提取故障深层特征，最后将深层特征连接到 Softmax 分类器输出故障诊断结果。

极大重叠离散小波变换 MODWT (maximal overlap discrete wavelet transform)是一种改进型小波变换[10]，通过依次分解将信号能量分解到不同频带，其主要特点是没有降采样过程和系数具有平移不变性，避免了原始信号中重要信息的丢失，同时各频带的能量对电网及负载参数变化有着优良的鲁棒性。针对目前 IGBT 开路故障诊断方法易受电网及负载参数变化的影响，以并网逆变器输出三相电流为检测信号，采用 MODWT 分解提取各频带能量作为故障特征值，最后采用改进的随机森林算法实现并网逆变器 IGBT 多种开路故障类型的诊断。

1 故障模式分析

1.1 故障模式

并网逆变系统主要由直流电源、逆变器、电感电容 LC (inductance capacitance)滤波器、传输线、母线等部分组成，如图 1 所示。其中并网逆变器由 a、b、c 三相桥臂构成，由于系统侧电压的作用，IGBT 开路故障时逆变器侧电流变化比电压变化显著。输出的三相电流 i_a、i_b、i_c 中包含有 IGBT 开路故障信息，不同故障类型因发生开路的管数量和

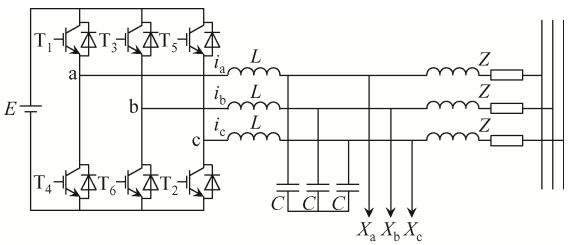


图 1 并网逆变系统的主要结构

Fig. 1 Main structure of grid-tied inverter system

上、下桥臂位置不同，将会导致三相电流波形存在差异，因此将逆变器输出三相电流作为开路故障检测信号。

整个并网逆变器共包含 6 个 IGBT 管，其开路故障主要指其中任意 1 个或 2 个管同时发生开路故障，而任意 3 个及以上管同时发生开路故障的情形十分罕见，故本文不加以考虑。据此将 IGBT 正常及开路故障划分为 5 大类，22 种小类：1 种正常运行状态；6 种上、下桥臂单管开路故障 T_1、T_3、T_5、T_4、T_6、T_2；3 种同相桥臂两管开路故障 T_1T_4、T_3T_6、T_5T_2；6 种同侧桥臂两管开路故障 T_1T_3、T_1T_5、T_3T_5、T_4T_6、T_4T_2、T_6T_2；6 种交叉侧桥臂两管开路故障 T_1T_6、T_1T_2、T_3T_4、T_3T_2、T_5T_4、T_5T_6。

1.2 IGBT 开路故障特征分析

本文主要研究有功无功(PQ)控制方法下的并网逆变器 IGBT 开路故障模式。并网逆变器三相正常输出电流如图 2 所示，将 1 个整周期划分为 6 个工作扇区，3 个桥臂只有“1”和“0”这 2 种状态，置 1 时上桥臂导通、下桥臂断开，置 0 时上桥臂断开、下桥臂导通。由于具有相同的电路结构，故只针对多种 IGBT 开路故障类型中的一种情形进行故障特征分析。

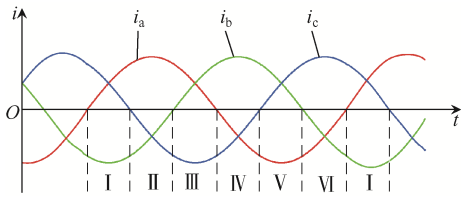


图 2　工作扇区划分

Fig. 2 Working sector division

1.2.1　单管故障

图 3 所示为上桥臂 T_1 发生开路故障时三相电流波形，i_a 在Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区为正向电流，在Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ区为负向电流，当上桥臂 T_1 发生开路故障，开关状态在Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区为 111 时，将引起 a 相电流正半周断流。因此，单个周期内 T_1 开路只会对 a 相电流造成正半周断流影响，负半周电流没有出现断流现象。同时，b、c 相电流不断流。其他单管故障时情况类似。

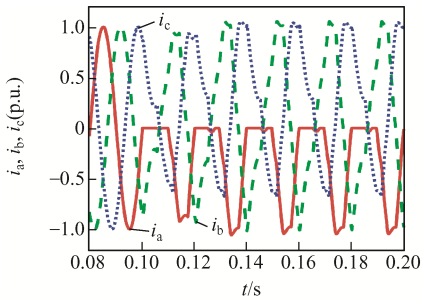


图 3　单管 T_1 开路故障时三相电流波形

Fig. 3 Three-phase current waveforms in case of open-circuit fault of the single tube T_1

1.2.2　两管故障

两管故障类型较多，图 4 所示为同相两管 T_1T_4 开路故障时三相电流波形，当上桥臂 T_1 发生开路故障，开关状态在Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区为 111 时，将引起 a 相电流正半周断流；当下桥臂 T_4 发生开路故障，开关状态在Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ区为 000 时，将引起 a 相电流负半周断流。因此，单个周期内 T_1 开路只会对 a 相电流造成正半周断流影响，T_4 开路只会对 a 相电流造成负半周断流影响，所以 T_1、T_4 同时开路时会造成 a 相电流断流。同时，b、c 相电流不断流。由于故障电流波形只与发生的故障相序相关，T_3T_6、T_5T_2 开路故障时情况类似。

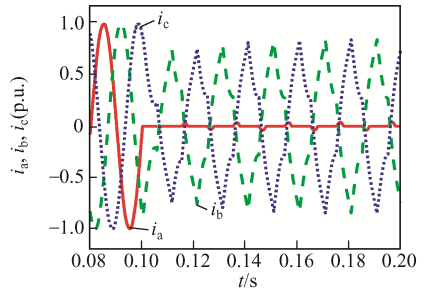


图 4　同相两管 T_1T_4 开路故障时三相电流波形

Fig. 4 Three-phase current waveforms in case of open-circuit fault of two tubes T_1T_4 in the same phase

图 5 所示为同侧上桥臂两管 T_1T_3 开路故障时三相电流波形，单个周期内 T_1 开路只会对 a 相电流造成正半周断流影响，T_3 开路只会对 b 相电流造成正半周断流影响。同时，由于电感的续流作用，c 相在Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ区正向续流，仅Ⅲ区负向断流。T_1T_5、T_3T_5、T_4T_6、T_4T_2、T_6T_2 开路故障时情况类似。

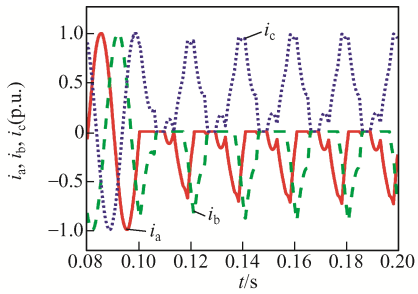


图 5 同侧两管 T_1T_3 开路故障时三相电流波形

Fig. 5 Three-phase current waveforms in case of open-circuit fault of two tubes T_1T_3 in the same side phases

图 6 所示为交叉侧上、下桥臂两管 T_1T_6 开路故障时三相电流波形，单个周期内 T_1 开路只会对 a 相电流造成正半周断流影响，T_6 开路只会对 b 相电流造成负半周断流影响。同时，c 相电流不断流。T_1T_2、T_3T_4、T_3T_2、T_5T_4、T_5T_6 开路故障时情况类似。

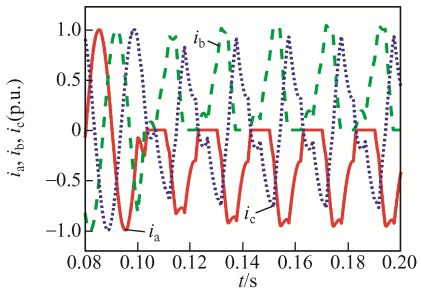


图 6 交叉侧两管 T_1T_6 开路故障时三相电流波形

Fig. 6 Three-phase current waveforms in case of open-circuit fault of two tubes T_1T_6 in the crossed phases

2 开路故障诊断算法

2.1 开路故障诊断算法流程

开路故障诊断算法流程如图 7 所示。由于绝大多数时间内并网逆变器都是正常工作的，为此增加 1 个 IGBT 开路故障检测环节，采用每 1/3 周期计算一次半周期均方根 RMS(root mean square)的方法进行判断。一旦 a、b、c 三相中任意一相电流 RMS 出现异常，则可能有开路故障发生。对三相电流进行采集，为了让诊断方法适用于不同功率的并网逆变器，将三相电流先进行标幺化处理，然后分别提取 MODWT 能量特征值，合并数据通过降维处理后输入故障诊断网络，得到最终的诊断结果。

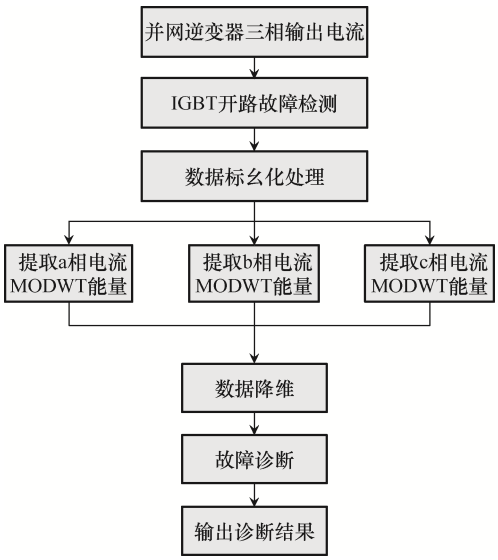


图 7 开路故障诊断算法流程

Fig. 7 Flow chart of open-circuit fault diagnosis algorithm

2.2 MODWT 能量特征值提取

2.2.1 MODWT 原理

离散小波变换 DWT(discrete wavelet transform)是一种有效的非平稳突变信号的时频分析方法，信号通过低通滤波器 $g(n)$和高通滤波器 $h(n)$可以分别得到近似系数和细节系数。在每一分解层，仅信号的低频分量继续进行分解，3 层 DWT 分解如图 8(a)所示，在任意第 j 分解层，分解系数计算公式为

$$S_j(k)=\sum_n g(n)S_{j-1}(2k-n) \tag{1}$$

$$T_j(k)=\sum_n h(n)S_{j-1}(2k-n) \tag{2}$$

式中：S_j、T_j 分别为 DWT 的近似系数、细节系数；n 为信号长度；k 为当前信号的位置。但 DWT 需要进行抽 2 降采样(↓2)，属于时变变换，即当信号平移时，小波系数不会因信号的移动而改变。为保证时间上对齐，需调整分解系数对应的输入参数。

MODWT 也是通过低通滤波器 $g'(n)$ 和高通滤波器 $h'(n)$ 得到近似系数和细节系数。3 层 MODWT 分解过程如图 8(b)所示，MODWT 没有降采样过程，是一种时不变小波变换，其变换系数的长度等于输

入信号的长度。因此，所有的分解系数对应于原始信号时间序列。在任意第 j 分解层，分解系数为

$$S'_j(k)=\sum_n g'(n)S'_j(k-n \bmod N) \tag{3}$$

$$T'_j(k)=\sum_n h'(n)S'_j(k-n \bmod N) \tag{4}$$

式中：S'_j、T'_j 分别为 MODWT 的近似系数、细节系数；N 为原始信号长度；n mod N 表示 n 除以 N 的余数；$g'(n)=g(n)/\sqrt{2}$；$h'(n)=h(n)/\sqrt{2}$。

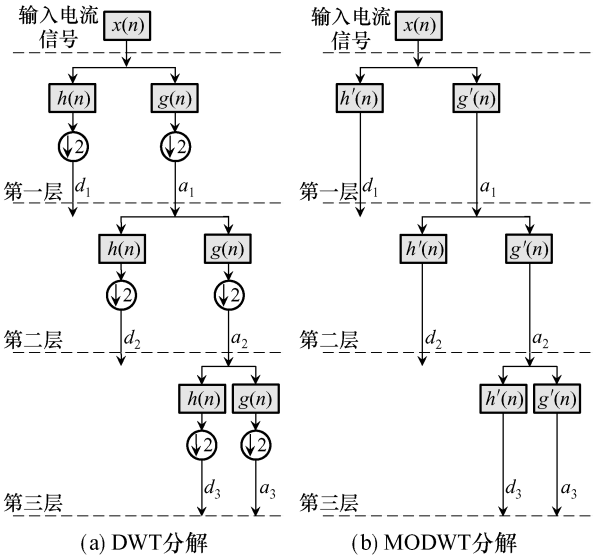


图 8　基于 DWT 和 MODWT 进行信号的 3 层分解

Fig. 8 Three-level examples of signal decomposition using DWT and MODWT

2.2.2　故障特征值提取

通过 1.2 节分析可知，并网逆变器 IGBT 开路故障必然表现为某些三相电流特征参量的变化，但由于电网及负载参数时常变化，时域、频域特征参量易受较大影响，造成区分故障类型困难。而 MODWT 将故障信号能量分解到不同频带，分解保持了系数与原始信号长度相等的特性，故分析故障信号的各频带特征，可避免处理开路故障信号时产生的频带混叠，而且 MODWT 能量对电网及负载参数变化有着优良的鲁棒性，这些特点能有效提高故障类型识别的正确率。因此本文提取逆变器输出三相电流的各频带 MODWT 能量作为故障特征值。

MODWT 需提前根据故障信号的频率设定分解层数。通过对故障信号进行 1 次 MODWT，可以获取 1 个低频分量和 1 个高频分量，然后继续对低频分量进行分解，直至分解到设定分解层数为止。并网逆变器输出三相电流 i_a、i_b、i_c 经 MODWT 分解后得到多个频带分量，然后提取各频带的 MODWT 能量以构建故障特征向量。

设对故障信号进行 j 层 MODWT 分解，可以得到 j+1 个分解节点(频带)，其中含 j 个高频分量和 1 个低频分量。分解节点序列的能量 $\{E^1, E^2, \cdots, E^{j+1}\}$ 求解表达式为

$$E^m==\sum_{k=1}^{N}\left|d_m(k)\right|^2 \tag{5}$$

式中，$d_m(k)$ 为第 m 个分解节点的第 k 个值 ($m=1, 2, \cdots, j+1$)。则故障信号特征向量为

$$\boldsymbol{E}=[E^1\ E^2\ \cdots\ E^{j+1}] \tag{6}$$

一般来说分解层数越多，信号频率分辨率越高，但同时运算也越复杂。综合考虑频率分辨率和运算复杂程度，本文采用 10 阶 Daubechies(db10)小波函数对采样信号进行 7 层分解，得到 8 个频带。图 9 为正常信号的 MODWT 能量分布。图 10(a)为图 3 对应的单管 T_1 开路故障时 MODWT 能量分布，图 10(b)为图 4 对应的同相两管 T_1T_4 开路故障时 MODWT 能量分布，图 10(c)为图 5 对应的同侧两管 T_1T_3 开路故障时 MODWT 能量分布，图 10(d)为图 6 对应的交叉侧两管 T_1T_6 开路故障时 MODWT 能量分布。从图 9~图 10 可以看出，不同开路故障类型具有不同的 MODWT 能量分布，因此 MODWT 能量可以作为故障特征值使用。

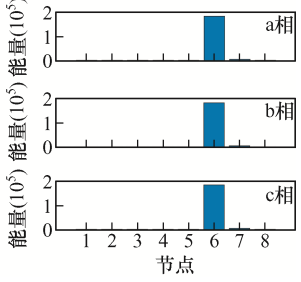
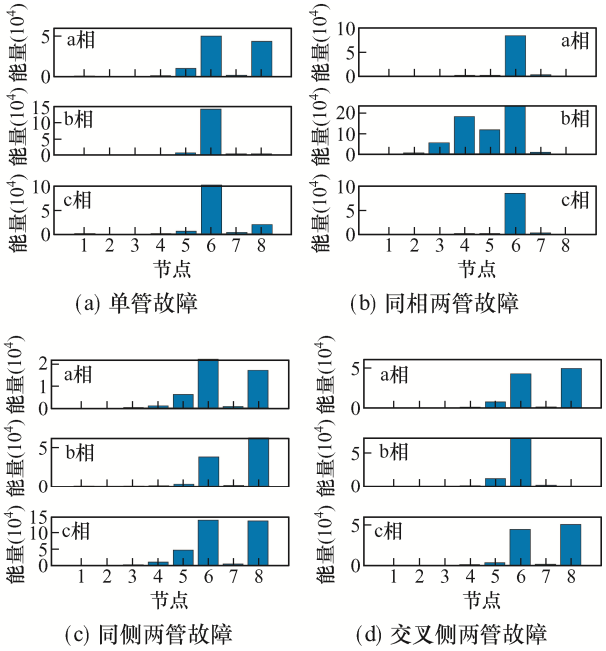


图 9　正常三相电流 MODWT 能量分布

Fig. 9 MODWT energy distribution of normal three-phase currents



(a) 单管故障 (b) 同相两管故障

(c) 同侧两管故障 (d) 交叉侧两管故障

图 10 开路故障时三相电流 MODWT 能量分布

Fig. 10 MODWT energy distribution of three-phase currents under open-circuit faults

2.3 故障特征向量降维

由于每相电流提取 8 个 MODWT 能量特征值，将三相数据合并，便构成 1 个 24 维的 MODWT 能量特征向量，由此造成了故障特征向量维数较高，同时这些能量特征值也存在冗余，不利于快速诊断，故需对故障特征向量进行降维处理。本文采用主成分分析 PCA (principal components analysis)算法，获取每个能量特征向量中较大的能量值构成新向量作为故障特征，用于最终故障诊断。

2.4 基于改进随机森林算法的故障诊断方法

2.4.1 传统随机森林算法

传统随机森林算法的基本单元是决策树，通过将多棵决策树进行集成，形成多个弱分类器来实现 1 个强分类器的效果，具有准确率高、不易过拟合、泛化能力强等优点[11]。

该算法使用了 2 个随机过程：一是随机挑选训练子集作为决策树的训练集，采用可放回式的随机抽样方法，以获得多个随机且独立的训练子集，每个训练子集用于构建基础的决策树分类器，且过程中不剪枝，最终多个决策树分类器形成随机森林模型；二是在决策树的生成过程中随机选择指定数量属性作为节点，这将大大降低多个弱分类器之间的相关性。该算法的具体步骤如下。

步骤 1 给定训练集数 T、特征数 X，从 T 中取样生成训练子集，其中训练子集数应小于 T。

步骤 2 从 X 个特征中随机挑选 x 个特征值用于构建决策树，通过训练子集的互斥选择 1 个子集作为该决策树的输入，按照决策树的生成算法构造该决策树。

步骤 3 重复步骤 1、步骤 2 至 K 次，生成 K 棵决策树，最终组成随机森林。

步骤 4 利用这 K 棵决策树对测试集数据进行分类，并汇集这 K 个分类结果，采用集成投票的方法计算出最终的分类结果。

2.4.2 改进随机森林算法

改进随机森林算法的思路是改进投票策略，将分类正确率转换为决策树的投票权重，即增加分类正确率高的决策树投票权重，降低分类正确率低的决策树投票权重，以提高随机森林的分类正确率。

在传统随机森林算法基础上，改进随机森林算法中的决策树分类正确率矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MK} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：a_{11}~a_{MK} 为分类结果；M 为故障类型数。由此得到权重矩阵为

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1K} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & \cdots & w_{MK} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中，w_{ij} 为第 i 类故障第 j 棵决策树的权重，且

$$w_{ij}=a_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{K}a_{ij} \tag{9}$$

图 11 所示为改进随机森林算法流程。

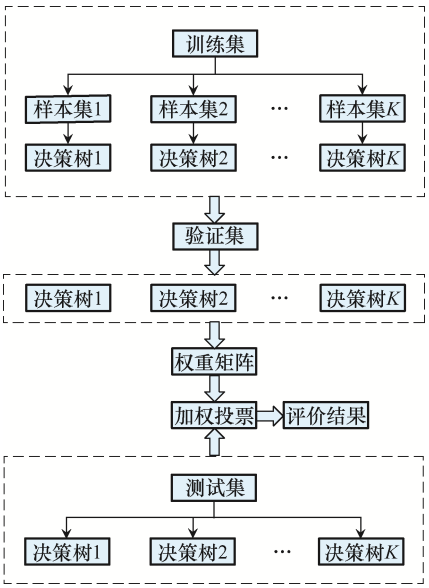


图 11　改进随机森林算法流程

Fig. 11 Flow chart of modified random forest algorithm

3　实验评估

3.1　系统仿真

为了对本文方法进行评估，采用 MATLAB/Simulink 对图 1 所示并网逆变系统进行仿真，仿真模型如图 12 所示。主要参数为：输入直流电压 800 V；交流侧电网线电压/频率 380 V/50 Hz；并网逆变器额定功率 20 kW；控制器开关频率 10 kHz；滤波电感 25 mH；滤波电容 5 μF；滤波电阻 0.01 Ω。

本文在不同电网和负载参数条件下对 18 种工况进行仿真，工况参数见表 1。每种工况又包括 22 种工作状态，即 1 种正常运行状态、6 种单管 IGBT 开路故障、3 种同相两管 IGBT 开路故障、6 种同侧两管 IGBT 开路故障和 6 种交叉侧两管 IGBT 开路故障。

3.2　故障诊断结果及分析

针对每种工作状态下采集原始的三相电流信号，每相电流采样时间窗为 2 个周期(0.04 s)，共采样 200 个点，然后滑动 10 个采样点后再次采样，采样参数不变，共采样 10 次，涵盖了 1 个周期内各种相位情况。每种工况可获得 220 个样本数据，18 种工况共获得 3 960 个样本数据，其中随机分配 2 420 个样本数据为训练集，220 个样本数据为验证集，1 320 个样本数据为测试集。另外，每个原始电流样本数据为 200×3 维，从原始电流样本数据中提取 MODWT 能量，则数据维度变成 8×3 维，合并成 1 个 24×1 维向量，即每个样本有 24 个特征值。最后采用 PCA 算法对样本进行降维，保留 50%的重构阈值，数据维度由 24 维降低到 12 维。

针对 18 种工况下 22 种故障类型，采用本文改进随机森林算法(M5)与 BPNN 方法(M1)[5]、KNN 方法(M2)[3]、自编码器方法(M3)[9]、SVM 方法(M4)[6]进行故障类型诊断策略的可行性验证与对比，运行 10 次，平均结果见表 2。其中 F1 表示采用 DWT

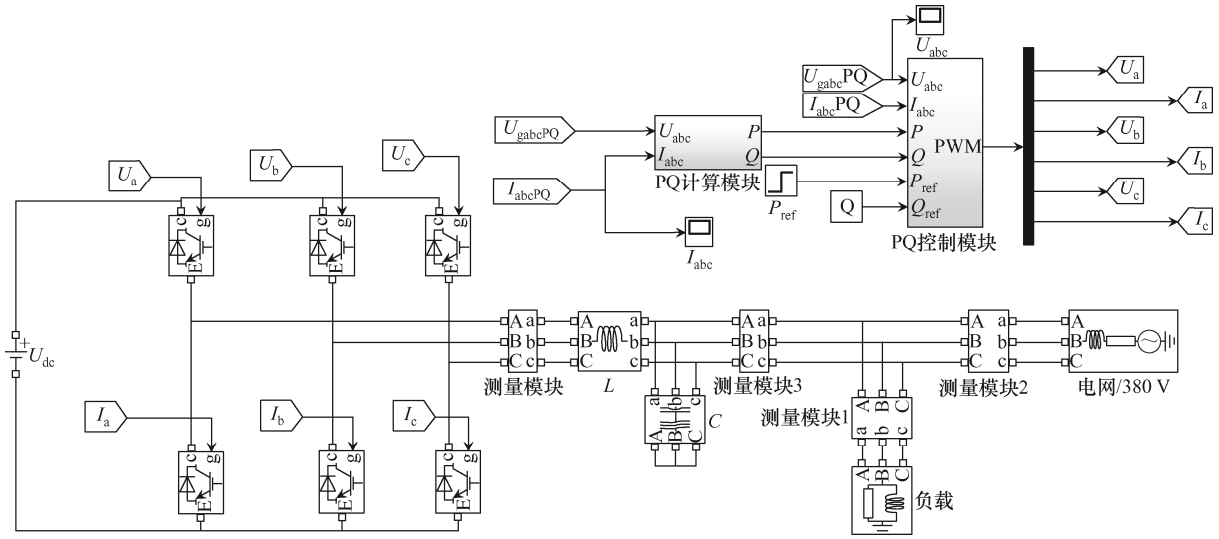


图 12　并网逆变系统仿真模型

Fig. 12 Simulation model of grid-tied inverter system

表 1 仿真工况参数

Tab. 1 Simulation condition parameters

工况编号	电网电压/V	电网频率/Hz	负载类型	视在功率/kVA	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	380	50.0	谐波负载(整流器)电流 THD15.7	11.2	10.0	5.0
2	380	50.0	RL 负载	20.0	16.0	12.0
3	380	50.0	RL 负载	20.0	17.0	10.5
4	380	50.0	RL 负载	20.0	18.0	8.7
5	380	50.0	RL 负载	20.0	19.0	6.2
6	380	50.0	RL 负载	20.0	20.0	0
7	380	50.2	RL 负载	20.0	18.0	8.7
8	380	50.1	RL 负载	20.0	18.0	8.7
9	380	49.9	RL 负载	20.0	18.0	8.7
10	380	49.8	RL 负载	20.0	18.0	8.7
11	400	50.0	RL 负载	20.0	18.0	8.7
12	390	50.0	RL 负载	20.0	18.0	8.7
13	370	50.0	RL 负载	20.0	18.0	8.7
14	360	50.0	RL 负载	20.0	18.0	8.7
15	380	50.0	RL 负载	30.0	27.0	13.1
16	380	50.0	RL 负载	25.0	22.5	10.9
17	380	50.0	RL 负载	15.0	13.5	6.5
18	380	50.0	RL 负载	10.0	9.0	4.4

表 2 故障诊断结果对比

Tab. 2 Comparison of fault diagnosis results

%

序号	故障管	M1(F2)	M2(F2)	M3(F2)	M4(F2)	M5(F1)	M5(F2)
1	正常运行	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	单管 T_1	100.0	96.7	96.7	95.0	76.7	98.3
3	单管 T_2	81.7	76.7	71.7	98.3	80.0	91.7
4	单管 T_3	71.7	71.7	78.3	95.0	85.0	98.3
5	单管 T_4	81.7	70.0	95.0	91.7	78.3	96.7
6	单管 T_5	76.7	100.0	100.0	95.0	86.7	96.7
7	单管 T_6	93.3	95.0	95.0	98.3	70.0	93.3
8	同相两管 T_1T_4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
9	同相两管 T_3T_6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
10	同相两管 T_5T_2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
11	同侧两管 T_1T_3	90.0	90.0	73.3	98.3	85.0	96.7
12	同侧两管 T_1T_5	86.7	80.0	80.0	95.0	78.3	90.0
13	同侧两管 T_3T_5	85.0	68.3	75.0	98.3	83.3	96.7
14	同侧两管 T_4T_6	91.7	90.0	90.0	98.3	85.0	95.0
15	同侧两管 T_4T_2	76.7	78.3	78.3	93.3	83.3	100.0
16	同侧两管 T_6T_2	75.0	85.0	76.7	90.0	76.7	95.0
17	交叉侧两管 T_1T_6	86.7	96.7	96.7	96.7	90.0	98.3
18	交叉侧两管 T_1T_2	85.0	95.0	95.0	98.3	78.3	96.7
19	交叉侧两管 T_3T_4	73.3	71.7	83.3	93.3	71.7	100.0
20	交叉侧两管 T_3T_2	83.3	81.7	81.7	98.3	90.0	96.7
21	交叉侧两管 T_5T_4	78.3	78.3	78.3	98.3	78.3	93.3
22	交叉侧两管 T_5T_6	86.7	95.0	95.0	93.3	75.0	96.7
	总计	86.5	87.3	87.4	96.6	84.2	96.8

能量作为特征值，F2 表示采用 MODWT 能量作为特征值。如表 2 所示，对于正常运行状态、同相两管 IGBT 开路故障可实现理想地区分，5 种方法诊断正确率均为 100.0%。对于单管 IGBT 开路故障、同侧两管 IGBT 开路故障和交叉侧两管 IGBT 开路故障，M1、M2、M3 诊断正确率均低于 90.0%，而 M4、M5 均采用二分类思想，对比另外 3 种方法有明显优势，诊断正确率均高于 90.0%，SVM 方法总体诊断正确率为 96.6%，改进随机森林算法诊断正确率为 96.8%，高于 SVM 方法。

另外，采用 DWT 对上述样本数据进行 7 层分解，提取各频带 DWT 能量作为故障特征值，采用本文改进随机森林算法进行故障类型诊断，10 次平均总诊断正确率为 84.2%。可见，采用 MODWT 能量作为故障特征值的诊断正确率要优于 DWT 能量作为故障特征值的诊断方法，说明选取 MODWT 能量作为故障特征值适合并网逆变器 IGBT 开路故障诊断。

为了进一步验证本文诊断方法的适用性，搭建了 1 个简易实验系统，如图 13 所示。系统主要由 PC 电脑、快速控制原型 RCP(rapid control prototyping) 模块、三相并网逆变器等部分构成。其中 RCP 模块为 YXSPACE 系列 SP1000 快速原型控制器，逆变器功率为 10 kW。在 PC 电脑中通过 MATLAB 的 Simulink 搭建控制模型，并设置好并网逆变器的开路故障模式，然后下载到 RCP 控制器中执行，即可实现整个控制过程，同时回采相关三相电流信号如图 14 所示，通过本文方法进行诊断，结果诊断为单管 T_1 发生开路故障，与实际故障类型相符。

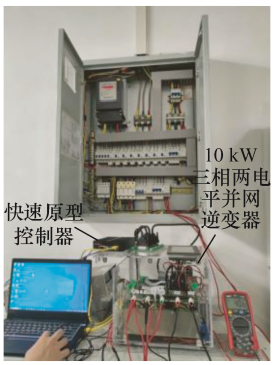


图 13　实验系统

Fig. 13 Experimental system

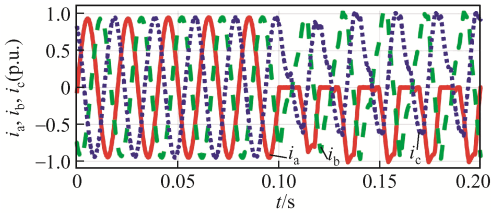


图 14　并网逆变器开路故障时三相电流波形

Fig. 14 Three-phase current waveforms in case of open-circuit fault of grid-tied inverters

4　结论

本文提出了一种改进随机森林算法的并网逆变器开路故障诊断方法。针对并网逆变器三相输出电流信号，经标幺化处理后，对三相电流分别提取 MODWT 能量作为不同故障类型的特征值。三相合并降维后输入到改进随机森林算法中进行并网逆变器 IGBT 开路故障诊断。

在多种工况的不同故障类型下，将本文提出的改进随机森林故障诊断方法与其他经典的诊断方法如 BPNN 方法、KNN 方法、自编码器方法、SVM 方法进行了对比验证。结果表明，本文方法具有更好的适应能力和诊断正确率，且仅用 20 kW 逆变器的数据进行训练即可在其他功率的逆变器工况下也能获得较好的诊断效果，为并网逆变器开路故障诊断提供了一种新方法。后续将针对多开路、电网谐波畸变等实际情况下的开路故障诊断做进一步研究。

参考文献：

[1] 孙权, 彭飞, 李宏胜, 等. 样本不均衡下基于 CGAN-CNN 的逆变器故障诊断方法[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 318-326.
Sun Quan, Peng Fei, Li Hongsheng, et al. Inverter fault diagnosis method based on CGAN-CNN under sample imbalance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 318-326. (in Chinese)

[2] Ji Xiaotong, Liu Dan, Xiong Ping, et al. Multiple open-switch faults detection for grid connected inverter [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 54: 102765.

[3] 陈文博, 程红, 王聪. 三相无桥功率因数校正器开路故障的快速诊断与定位策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3873-3883.
Chen Wenbo, Cheng Hong, Wang Cong. A fast open circuit fault diagnosis and location strategy for three-phase bridgeless power factor corrector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3873-3883. (in Chinese)

[4] Huang Zhanjun, Wang Zhanshan. A multiswitch open-circuit fault diagnosis of microgrid inverter based on slidable triangularization processing [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 922-930.

[5] 崔博文, 任章. 基于傅里叶变换和神经网络的逆变器故障检测与诊断[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 37-43.
Cui Bowen, Ren Zhang. Fault detection and isolation of inverter based on FFT and neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 37-43. (in Chinese)

[6] 时维国, 吴宁. 基于小波包变换和 SVM 的三电平逆变器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 91-95, 100.
Shi Weiguo, Wu Ning. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet packet transform and support vector machine [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 91-95, 100. (in Chinese)

[7] 宋倩宁, 王庆贤, 董海鹰. 经验模态分解与样本熵在并网型光伏逆变器故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3929-3932.
Song Qianning, Wang Qingxian, Dong Haiying. Application of EMD and sample entropy in fault diagnosis of grid-connected photovoltaic inverter [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(12): 3929-3932. (in Chinese)

[8] 孟令琦, 高岚, 李然, 等. 三峡升船机变频器 IGBT 开路故障诊断[J]. 中国航海, 2020, 43(3): 89-96.
Meng Lingqi, Gao Lan, Li Ran, et al. Diagnosis of open circuit IGBT fault for Three Gorges ship lift [J]. Navigation of China, 2020, 43(3): 89-96. (in Chinese)

[9] 尹桥宣, 段斌, 沈梦君, 等. 模块化五电平逆变器子模块开路故障的智能诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 127-133, 147.
Yin Qiaoxuan, Duan Bin, Shen Mengjun, et al. Intelligent diagnosis method for open-circuit fault of sub-modules in modular five-level inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 127-133, 147. (in Chinese)

[10] 靳一玮, 高彦杰, 陈佳慧. 基于 MODWT 的自适应阈值微电网故障检测算法[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(1): 31-36.
Jin Yiwei, Gao Yanjie, Chen Jiahui. Adaptive threshold algorithm for microgrid fault detection based on MODWT [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(1): 31-36. (in Chinese)



张明

作者简介：

张明(1970—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：分布式新能源发电故障监测。E-mail：zhangming@wtu.edu.cn。

张倩(1997—)，女，硕士研究生。研究方向：分布式新能源发电故障监测。E-mail：1356170559@qq.com。

李效(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：信号处理。E-mail：1192366024@qq.com。

叶轩(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：新型电力电子装置。E-mail：896598450@qq.com。

何顺帆(1984—)，男，博士，副教授。研究方向：电能质量分析与控制技术。E-mail：348852424@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)