

文章编号:1671-251X(2019)01-0076-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018090081

矿用干式变压器局部放电模式识别方法

唐建伟¹, 苏红¹, 严家明¹, 张建文¹, 王金川¹, 王恩俊²

(1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008;
2. 中国能源建设集团 安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要:为提高矿用干式变压器局部放电模式识别准确率,提出了一种矿用干式变压器局部放电模式识别方法。首先,采用正交匹配追踪算法对原始局部放电信号进行去噪,最大程度保留原始局部放电信号的有用信息;然后,通过自回归模型提取去噪后局部放电信号的自回归系数特征;最后,将自回归系数特征输入随机森林集成分类器对局部放电模式进行识别。实验结果表明,该方法平均识别准确率达98%。

关键词:矿用干式变压器;局部放电;正交匹配追踪;自回归系数特征;随机森林集成分类器
中图分类号:TD611 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181227.1657.004.html>

Partial discharge pattern recognition method for mine-used dry-type transformer

TANG Jianwei¹, SU Hong¹, YAN Jiaming¹, ZHANG Jianwen¹,
WANG Jinchuan¹, WANG Enjun²

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China; 2. Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd.,
China Energy Engineering Group, Hefei 230000, China)

Abstract: In order to improve recognition accuracy of partial discharge pattern of mine-used dry-type transformer, a partial discharge pattern recognition method for mine-used dry-type transformer was proposed. Firstly, orthogonal matching pursuit algorithm is used to denoise original partial discharge signal, which can retain useful information of the original partial discharge signal to the greatest extent. Then, autoregressive coefficient features of the partial discharge signal after denoising are extracted by autoregressive model. Finally, the autoregressive coefficient features are input into random forest integrated classifier to recognize partial discharge pattern. The experimental result shows that average recognition accuracy of the method is 98%.

Key words: mine-used dry-type transformer; partial discharge; orthogonal matching pursuit; autoregressive coefficient feature; random forest integrated classifier

0 引言

矿用干式变压器作为煤矿井下主要的供电设备,其可靠运行是煤矿安全生产的重要保障。局部放电是电气设备绝缘受损的重要预兆^[1-2],不同局部放电模式的形成机理不同,对绝缘损害的程度也不

同。因此,矿用干式变压器局部放电模式的准确识别,对评估当前矿用干式变压器的绝缘状况、提高井下供电可靠性具有重要意义。

局部放电模式识别过程主要包含信号去噪、特征提取、分类器选择3个部分。局部放电信号去噪方法主要有FFT数字滤波法^[3]、自适应滤波法^[4]、

收稿日期:2018-09-28;修回日期:2018-12-18;责任编辑:盛男。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFF0210600)。
作者简介:唐建伟(1991—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电气设备状态检测与故障诊断技术,E-mail:2172738651@qq.com。
引用格式:唐建伟,苏红,严家明,等. 矿用干式变压器局部放电模式识别方法[J]. 工矿自动化,2019,45(1):76-80.
TANG Jianwei, SU Hong, YAN Jiaming, et al. Partial discharge pattern recognition method for mine-used dry-type transformer[J].
Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 76-80.

小波阈值法^[5]等。FFT 数字滤波法可很好地抑制周期性窄带干扰,但针对局部放电信号,难以确定阈值;自适应滤波法对单一频率信号去噪效果较好,但在局部放电信号去噪过程中收敛性较差,效果不稳定;小波阈值法适用于非平稳信号分析,但分解结果依赖小波基、分解层数及阈值的选择,自适应能力较差。局部放电信号特征提取方法主要包括统计特征参数法、分形特征参数法和矩特征参数法等。文献[6]基于统计特征对局部放电模式进行识别,识别准确率较高,但在局部放电信号所含噪声很大的情况下识别准确率不高;文献[7]基于分形特征对气体绝缘组合电器局部放电模式进行识别,但对固定金属丝放电识别率较低;文献[8]基于矩特征对针-板和球-板模式的局部放电进行识别,具有较高的识别率,但对其他放电模式识别率偏低。以上特征均从基于局部放电相位分布(Phase Resolved Partial Discharge, PRPD)的二维图谱、三维图谱及灰度图中提取,在特征提取过程中会损失部分局部放电特征信息,不适用于对所有模式的局部放电进行准确识别。目前应用较广泛的局部放电模式识别分类器采用 BP 神经网络、支持向量机(Support Vector Machine, SVM),但 BP 神经网络对初始权值、阈值的选取敏感, SVM 的识别效果则依赖于核函数的选择。

本文提出了一种矿用干式变压器局部放电模式识别方法。首先,采用正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法对原始局部放电信号进行去噪;然后,通过自回归模型提取去噪后局部放电信号的自回归系数特征;最后,利用随机森林(Random Forest, RF)集成分类器对局部放电模式进行识别。

1 局部放电模式识别

1.1 OMP 算法去噪

对于 Hilbert 空间内任意信号 f ,在过完备原子库中进行正交投影,则信号 f 可分解为

$$f = [f, g_{\gamma_1}]g_{\gamma_1} + R^1 f \quad (1)$$

式中: g_{γ_1} 为第 1 次分解时选择的最佳匹配原子; $[f, g_{\gamma_1}]g_{\gamma_1}$ 为信号 f 在 g_{γ_1} 上的投影; $R^1 f$ 为第 1 次分解后的残差信号。

对残差信号进行 x 次分解($x=2,3,\cdots,n,n$ 为分解次数),得

$$R^{x-1} f = [R^{x-1} f, g_{\gamma_x}]g_{\gamma_x} + R^x f \quad (2)$$

式中: g_{γ_x} 为第 x 次分解时选择的最佳匹配原子; $[R^{x-1} f, g_{\gamma_x}]g_{\gamma_x}$ 为信号 f 第 $x-1$ 次分解后的残差信号 $R^{x-1} f$ 在 g_{γ_x} 上的投影; $R^x f$ 为第 x 次分解后

的残差信号。

因此, Hilbert 空间内任意信号 f 在过完备原子库中经过 n 次分解后的表达式为

$$f = [f, g_{\gamma_1}]g_{\gamma_1} + \sum_{x=2}^n [R^{x-1} f, g_{\gamma_x}]g_{\gamma_x} + R^n f \quad (3)$$

式中 $R^n f$ 为第 n 次分解后的残差信号。

局部放电信号波形具有一定的结构特性,已建立的过完备原子库中的匹配原子结构特性与局部放电信号波形结构特性一致,而原始局部放电信号中含有的白噪声无结构特性,与已建立的过完备原子库中的匹配原子结构特性呈弱相关甚至不相关,因此通过上述分解可有效抑制局部放电信号中的噪声。根据局部放电信号波形的结构特性,本文选择 Gabor 原子库作为信号分解的过完备原子库。同时为实现快速去噪,将 Gabor 原子库中每一个原子进行正交化,之后再行信号分解。

1.2 自回归系数特征提取

实际采集的局部放电信号为时间序列^[10],设长度为 m 的局部放电信号时间序列为 $y_t(t=1,2,\cdots,m)$,其 p 阶自回归模型的数学描述为

$$y_t = a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \cdots + a_p y_{t-p} + v_t \quad (4)$$

式中: $a_1, a_2, \cdots, a_p$ 为自回归模型系数; v_t 为自回归模型残差。

本文采用 AIC(Akaike Information Criterion)准则^[11]来确定 p ,通过 Burg 算法^[12]确定 $a_1, a_2, \cdots, a_p$ 并进行归一化处理,将归一化值作为局部放电信号的自回归系数特征。

1.3 RF 集成分类器识别

RF 集成分类器本质上是一种集中学习方法^[13-15],其最大特点是同时训练 1 组分类器,然后对该组分类器中每一个分类器的识别结果进行投票,最终做出决策,保证分类器能全面分析样本特性,不易陷入局部最优。

RF 集成分类器实现步骤如下。

(1) 利用 Bagging 抽样法^[13]抽取 N 个不同训练子集,利用 N 个不同训练子集构建 N 棵分类回归树。

(2) 通过 Forestes-RI 方法^[14]选取 F 个特征变量分配给每一棵分类回归树。

(3) 依据分类回归树算法中 Gini 指标最小原则^[16],将所有分类回归树的节点进行分裂,分裂后每一棵分类回归树之间彼此相互独立,在分裂过程中不进行剪枝处理。

(4) 将这些相互独立的分类回归树看作一个整体,形成 RF 集成分类器。

2 实验平台

根据 CIGRE II 标准制作 3 种典型的局部放电故障缺陷模型,如图 1 所示。

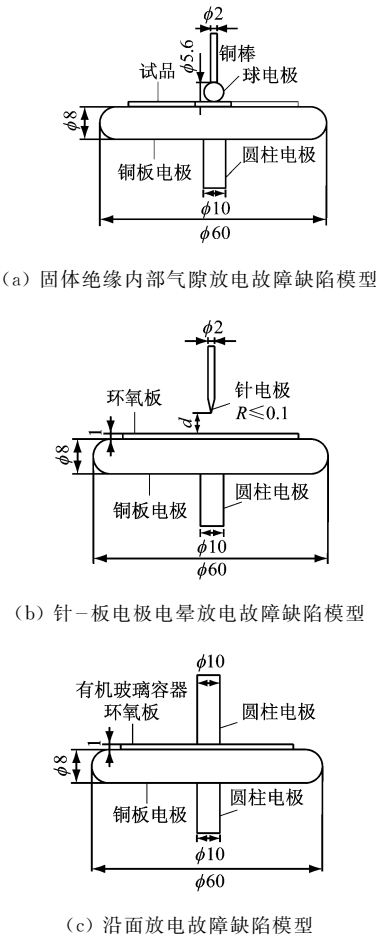


图 1 典型局部放电故障缺陷模型

Fig. 1 Typical partial discharge fault defect models

利用脉冲电流法采集典型局部放电故障缺陷模型放电信号,实验平台如图 2 所示。220 V 交流电压经过自耦调压器 T_1 和变压器 T_2 升压至 0~50 kV 的放电电压;变压器 T_2 额定电压为 50 kV,额定容量为 50 kVA; R 为保护水阻; C_1, C_2 为分压电容,分压比为 2 000:1; C_k 为 990 pF 的耦合电容;采用 500 MHz 带宽的 Infiniium 系列示波器。对于不同模型的局部放电,各采集 100 个周期的样本数据。

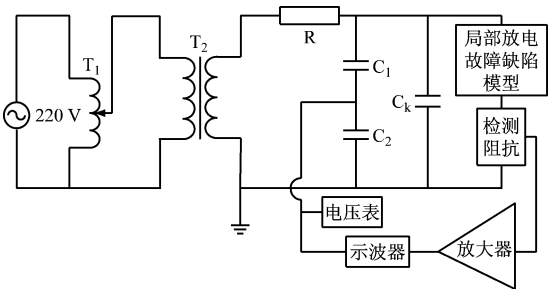


图 2 局部放电实验平台

Fig. 2 Partial discharge experimental platform

3 实验结果与分析

3.1 局部放电信号去噪结果

以矿用干式变压器常见的固体绝缘内部气隙放电原始信号为例,分别采用小波阈值法和 OMP 算法对 1 个周期的原始信号进行去噪,结果如图 3 所示。

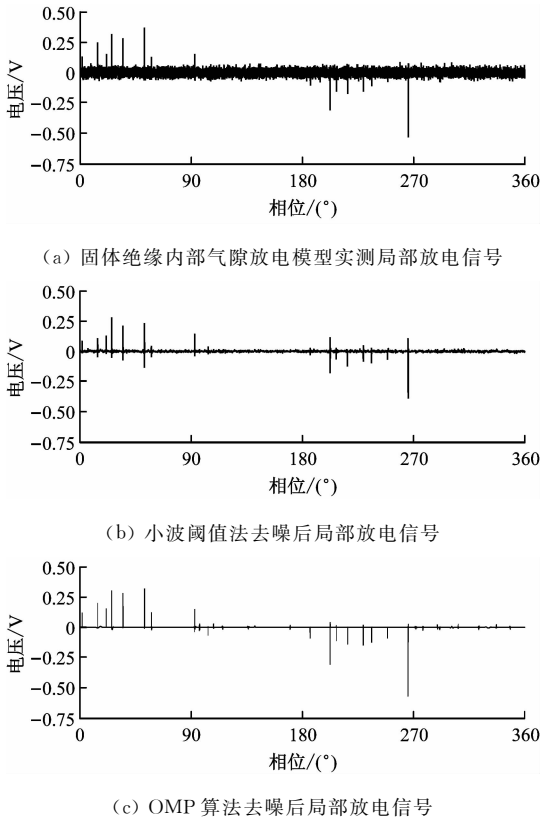


图 3 不同算法下局部放电信号去噪效果对比

Fig. 3 Comparison of denoising effect of partial discharge signal under different algorithms

噪声抑制比^[17]可反映信号中有用信息及噪声,噪声抑制比越大,表明信号中有用信息含量越高、噪声越低^[18-19]。根据图 3 可得基于小波阈值法、OMP 算法去噪后信号的噪声抑制比分别为 8.36 和 15.20,相比小波阈值法,OMP 算法的去噪效果更好,能够保留更多的原始局部放电信号的电压幅值、放电次数等信息。

3.2 基于不同特征的局部放电模式识别结果

采用 OMP 算法对原始局部放电信号去噪后,分别提取分形特征、矩特征和自回归系数特征,并将这 3 种不同特征输入到 RF 集成分类器对局部放电模式进行识别,结果见表 1。

从表 1 可看出,针对不同故障类型的局部放电信号,基于分形特征或矩特征的局部放电模式识别准确率均低于基于自回归系数特征的局部放电模式识别准确率。

表 1 基于不同特征的局部放电模式识别准确率

Table 1 Recognition accuracy of partial discharge pattern based on different features %

特征	识别准确率			
	气隙放电	电晕放电	沿面放电	平均
分形特征	87.1	84.3	91.1	87.5
矩特征	77.6	91.4	96.1	88.4
自回归系数特征	96.2	97.8	100.0	98.0

3.3 分类器识别结果

在 OMP 算法去噪和自回归系数特征提取的情况下,分别采用 BP 神经网络分类器、SVM 分类器和 RF 集成分类器的局部放电模式识别准确率见表 2。

表 2 基于不同分类器的局部放电模式识别准确率

Table 2 Recognition accuracy of partial discharge pattern based on different classifiers %

分类器	识别准确率			
	气隙放电	电晕放电	沿面放电	平均
BP 神经网络分类器	90.0	75.0	85.0	83.3
SVM 分类器	95.0	90.0	90.0	91.7
RF 集成分类器	96.2	97.8	100.0	98.0

从表 2 可看出,采用 RF 集成分类器的平均识别准确率达 98.0%,比 BP 神经网络分类器和 SVM 分类器的平均识别准确率分别高 14.7%和 6.3%。

4 结语

矿用干式变压器局部放电模式识别方法采用 OMP 算法对原始局部放电信号进行有效去噪,能最大程度保留原始局部放电信号的有用信息;通过自回归模型对去噪后的局部放电信号提取自回归系数特征,该特征包含了不同故障类型局部放电信号之间最原始的差异信息;利用 RF 集成分类器对局部放电模式进行识别,不易陷入局部最优。实验结果表明,该方法平均识别准确率达 98%。

参考文献(References):

[1] 杨宁,阎春雨,毕建刚,等. 超声波局部放电检测仪校验方法研究及应用[J]. 电测与仪表,2014,51(22): 104-109.
YANG Ning, YAN Chunyu, BI Jiangang, et al. Research on calibration technology of ultrasonic partial discharge detector and its application[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51 (22):104-109.

[2] 郭少朋,韩立,徐鲁宁,等. 光纤传感器在局部放电检测中的研究进展综述[J]. 电工电能新技术,2016,35

(3):47-53.

GUO Shaopeng, HAN Li, XU Luning, et al. Review of research on fiber optic sensors for partial discharge detection [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(3):47-53.

[3] 赵敏. FFT 变换与小波变换在变压器局部放电信号去噪中的应用[J]. 变压器,2009,46(5):28-31.
ZHAO Min. Application of FFT and wavelet transforms to noise elimination of transformer partial discharge signals [J]. Transformer, 2009, 46 (5): 28-31.

[4] 王洪涛,郑乃清,刘辉军. 基于共振稀疏分解的局部放电信号窄带干扰抑制新方法[J]. 工矿自动化,2015, 41(5):68-73.
WANG Hongtao, ZHENG Naiqing, LIU Huijun. A new method of narrowband interference suppression of partial discharge signal based on resonance sparse decomposition[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5):68-73.

[5] 张建安,陈焕栩,周鹏. 基于小波阈值的局部放电去噪新方法[J]. 电工电能新技术,2017,36(8):80-88.
ZHANG Jianwen, CHEN Huanxu, ZHOU Peng. New de-noising method for partial discharge signals based on wavelet threshold [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36 (8): 80-88.

[6] 褚鑫,张建安,韩刚. 统计特征参数及多分类 SVM 的局部放电类型识别[J]. 电测与仪表,2015,52(7): 35-39.
CHU Xin, ZHANG Jianwen, HAN Gang. Partial discharge pattern recognition based on statistical parameters and multi-classifications SVM [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52 (7):35-39.

[7] 弓艳朋,刘有为,吴立远. 采用分形和支持向量机的气体绝缘组合电器局部放电类型识别[J]. 电网技术, 2011,35(3):135-139.
GONG Yanpeng, LIU Youwei, WU Liyuan. Identification of partial discharge in gas insulated switchgears with fractal theory and support vector machine[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 135-139.

[8] 周沙,景亮. 基于矩特征与概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(3): 98-102.
ZHOU Sha, JING Liang. Pattern recognition of partial discharge based on moment features and probabilistic neural network [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3):98-102.

[9] 杨宇. 基于级联稀疏表示分类器的人脸识别算法[J]. 工矿自动化,2014,40(5):46-48.

- YANG Yu. Face recognition algorithm based on cascade sparse representation-based classifier [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5): 46-48.
- [10] 唐志国, 唐铭泽, 李金忠, 等. 电气设备局部放电模式识别研究综述 [J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2263-2277.
- TANG Zhiguo, TANG Mingze, LI Jinzhong, et al. Review on partial discharge pattern recognition of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2263-2277.
- [11] 张建文, 王恩俊, 陈焕栩, 等. 基于自回归模型和超球面支持向量机的局部放电模式识别 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 29-34.
- ZHANG Jianwen, WANG Enjun, CHEN Huanxu, et al. Partial discharge pattern recognition based on autoregression model and hypersphere support vector machine [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(9): 29-34.
- [12] 李明, 王晓茹. 一种用于电力系统间谐波谱估计的自回归模型算法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 72-76.
- LI Ming, WANG Xiaoru. An autoregressive model algorithm for the inter-harmonic spectral estimation in the power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 72-76.
- [13] CUTLER K, BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2004, 45(1): 157-176.
- [14] 曹正凤. 随机森林算法优化研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.
- [15] 于凯. 基于随机森林的局部放电识别分析 [J]. 电子世界, 2017(17): 152.
- [16] 罗新. 基于随机森林的文本分类模型研究 [J]. 农业图书情报学刊, 2016, 28(11): 50-54.
- LUO Xin. Research on text classification model based on random forests [J]. Journal of Library and Information Sciences in Agriculture, 2016, 28(11): 50-54.
- [17] 罗新, 牛海清, 胡日亮, 等. 一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 167-175.
- LUO Xin, NIU Haiqing, HU Riliang, et al. A modified method of suppressing narrow-band interference using fast Fourier transform power spectrum [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 167-175.
- [18] 周凯, 谢敏, 赵世林, 等. 基于改进 FastICA 的局部放电在线监测窄带干扰高保真性抑制方法 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2604-2612.
- ZHOU Kai, XIE Min, ZHAO Shilin, et al. Periodic narrowband noise rejection with high fidelity of partial discharge on line monitoring based on improved FastICA algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2604-2612.
- [19] 唐炬, 黄江岸, 张晓星, 等. 局部放电在线监测中混频周期性窄带干扰的抑制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 121-127.
- TANG Ju, HUANG Jiang'an, ZHANG Xiaoxing, et al. Suppression of the periodic narrow-band noise with mixed frequencies in partial discharge on-line monitoring [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 121-127.