

基于零相位误差滤波的局部放电故障识别

赖联有, 许伟坚

(集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 开关柜局部放电信号中混有较大的噪声信号, 传统的有限冲激响应 (finite impulse response, FIR) 滤波方法会造成滤波后信号相位的偏移, 从而影响以功率谱为特征量的故障识别的正确率。针对这种情况, 提出了基于零相位误差滤波方法的局部放电故障识别方法。首先, 通过高速电流互感器采集局部放电信号。然后, 采用零相位误差滤波 (zero phase error filtering, ZPEF) 滤除放电信号中的噪声。其次, 通过 FFT 变换分析放电信号的功率谱, 取 1.0~1.5 MHz 和 2.5~3.0 MHz 2 个频段的功率谱构造特征向量。最后, 采用最小二乘支持向量机对局部放电信号进行故障识别。实验结果表明, 采用 ZPEF 可以提高局部放电故障的识别率。由此也得出一个推论: 在确保相同的故障识别率的情况下, 采用 ZPEF 可以提高故障的识别速度。

关键词: 局部放电; 故障识别; 零相位误差滤波; 支持向量机; 开关柜

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)03-0067-05

0 引言

开关柜主要起开通和关断电力线路的作用, 其可靠性能直接影响到电力系统的稳定性, 是电力系统的重要设备之一。但是, 受环境等因素的影响或长时间使用下, 开关柜内部可能出现绝缘材料老化、导体接触不良等情况, 可能导致设备故障、电网停电和工厂停工^[1-5]。统计表明, 开关柜的主要故障是绝缘故障, 绝缘故障的主要表现是局部放电 (partial discharge, PD)^[6-9]。导致 PD 的因素还有安全距离过小, 电场分布不均匀, 空气潮湿过大等^[10-13]。对开关柜局放进行 PD 检测, 有助于发现并排除各种安全隐患, 提高系统的可靠性。

采集到的开关柜 PD 信号中通常混有较大的噪声, 因此需要对信号进行滤波。通常的滤波方法, 如有限冲激响应 (finite impulse response, FIR)、无限冲激响应 (infinite impulse response, IIR) 等, 在滤除信号中噪声的同时会改变信号的相位, 即滤波后的信号与原始信号相位不一致, 存在着一个相位差^[14-16], 从而导致信号频谱和功率谱发生偏移。如果采用频谱或功率谱作为特征量进行识别, 势必影响故障识别的准确性。针对该情况, 本文提出采用零相位误差滤波 (zero phase error filtering, ZPEF) 算法对信号进行滤波, 确保滤波后信号的频谱和功率谱不发生偏移。然后提取两个频带上的能量占比构造特征量, 采用最小二乘支持向量机 (least

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2015J01266); 福建省中青年教育科研项目 (JAT160262); 集美大学李尚大教育基金资助项目 (ZC2016010)

squares support vector machine, LS-SVM) 算法实现 PD 故障识别。

1 ZPEF 算法

1.1 ZPEF 的原理

目前, ZPEF 方法主要有 FRR (forward-reverse filtering, reverse output) 法和 RRF (reverse-reverse filtering, forward output) 法两种^[17-18]。ZPEF 方法的滤波原理如图 1 所示。从图 1 可知 FRR 滤波方法的过程是: 先将输入信号按顺序滤波, 然后将所得结果的顺序反转, 再将反转后的信号再次滤波, 最后将滤波结果的顺序反转后输出。与 FRR 相似, RRF 滤波方法的过程是: 先将输入信号的顺序反转, 然后将反转后结果滤波, 再将滤波结果的顺序反转, 反转后的信号再次滤波。FRR 和 RRF 滤波方法的特点是: 信号的顺序都要经过 2 次反转, 信号要 2 次通过滤波器。ZPEF 方法在物理上是不可实现的, 不存在与其相对应的模拟滤波器, 必须采用数字滤波方法才能实现。

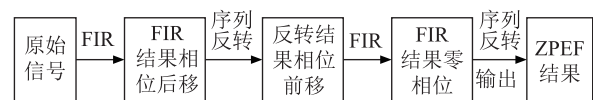


图 1 FRR 滤波原理

Fig.1 The principle of FRR filtering

1.2 ZPEF 对相位的影响

以 FRR 滤波为例, 在滤波过程中信号的相位变化如图 2 所示。图 2 中, y_0 是带噪声的初始信号, 其相位为 0; y_1 是对 y_0 滤波后得到的信号, 其相位滞后 45° ; y_2 是对 y_1 反转后得到的信号, 其相位由

y_1 滞后 45° 变为超前 45° ; y_{out} 是对 y_2 滤波后得到的信号, 由于 y_2 相位超前, 经过滤波后, y_{out} 的相位回归为零。 y_{out} 和相比 y_0 , 实现了零相位误差滤波。

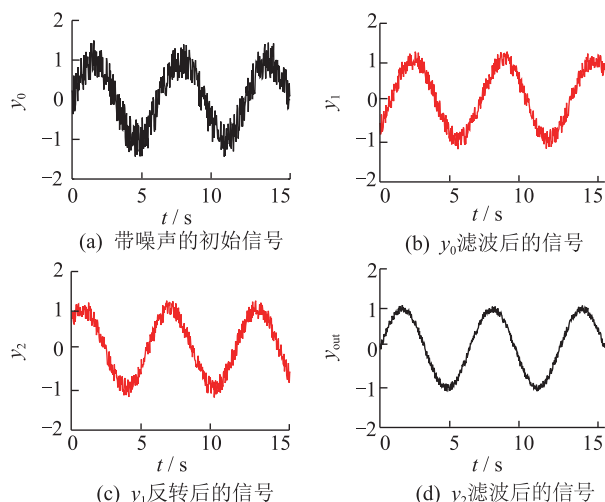


图2 FRR 滤波过程中信号的相位变化

Fig.2 Phase change of signal in FRR filtering process

一个 ZPEF 方法的例子: 假设初始信号为带噪声的正弦信号, 其表达式为 $y(t) = \sin(100 \times 2\pi t) + (\text{rand}-0.5)$, 其中 $(\text{rand}-0.5)$ 是幅度为 0.5 均值为 0 的噪声。 FRR 和 FIR 的滤波效果如图 3 所示。

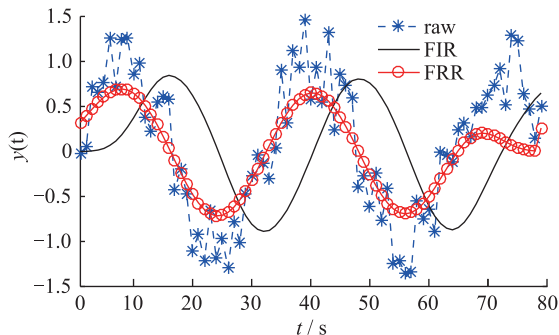


图3 FRR 和 FIR 滤波效果对比

Fig.3 The result of FRR vs FIR

图 3 可以看出: FRR 滤波有效的滤除了信号中的噪声, 效果非常好, 并且 FRR 滤波前后信号的相位没有发生变化, 实现了零相位差滤波。

1.3 ZPEF 对功率谱的影响

FRR 和 FIR 滤波后信号功率谱如图 4 所示。图 4 表明: 与 FIR 滤波相比, FRR 滤波后信号的功率谱峰值更明显, 能量更集中, 与真实信号的功率谱更接近。因此, 采用 ZPEF 的 FRR 滤波可保证滤波后信号在特征频段内的功率占比的准确性。

2 PD 故障识别方法

本文中, PD 故障识别采用 LS-SVM 方法, 即采用 LS-SVM 方法构造故障识别器。

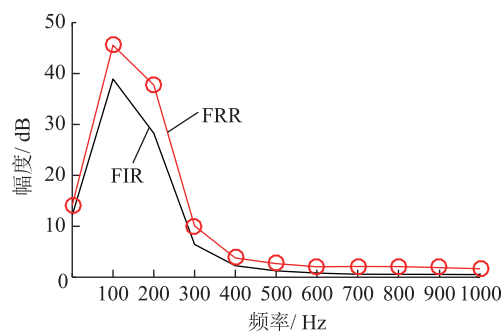


图4 FRR 和 FIR 滤波后的频谱

Fig.4 The spectrum after FRR and FIR filtering

2.1 LS-SVM

SVM 的理论基础是统计学习, 其基本思想是: 以结构风险最小化为目标, 通过训练样本集中的一组特征子集, 实现对支持向量的线性划分, 并将该划分等价于对整个数据集的划分, 以此克服维数灾难问题^[17-21]。为了降低计算的复杂度, Suykens 和 Vandewalle 改进了传统的 SVM, 提出 LS-SVM 方法^[22-23]。与传统的 SVM 相比, LS-SVM 的特点为: 把不等式约束条件转化为等式约束条件, 把训练过程中的二次规划问题求解转化为线性方程组的求解, 从而大大减小计算量。

2.2 PD 故障特征量的选取

能量高峰的出现可以作为判断是否发生 PD 故障的识别依据, 即可取在局放频带上的能量占比作为 PD 故障识别的特征量。通常, 发生某种类型的 PD 时, 在频谱上会出现相应的能量高峰。采用高峰能量占比为特征量进行分类时要注意: 如果不同的 PD 的中心频率不重叠, 则可采用该方法进行分类, 并能识别是否发生 PD 及发生 PD 的类型; 如果不同的 PD 中心频率重叠, 则只能识别是否发生 PD, 而不能识别 PD 的类型; 如果同时发生很多种类型的 PD, 且各种 PD 的中心频率较接近, 则会导致频谱放电高峰不明显, 不能识别是否发生放电。

3 实验及分析

3.1 实验平台及实验参数

实验平台的原理如图 5 所示, 实验系统主要由 4 部分组成: 高压开关柜, PD 信号测量分析系统, PD 检测系统和电压调节电路。高压开关柜型号为 KYN28A-12。PD 信号测量分析系统主要由电流互感器、示波器和计算机组成。电流互感器型号为 ETA5315, 带宽 60 MHz。示波器型号为 TDS3054C 数字泰克示波器, 既可以观测信号, 又可以把信号传输到计算机, 起数据采集作用。PD 检测系统主要由 HD-2010 双通道数字式 PD 检测仪组成。电

压调节电路主要由 YDWT-10 kV·A 无局放试验变压器组成。PD 检测系统根据脉冲电流法设计,采用并连接法。

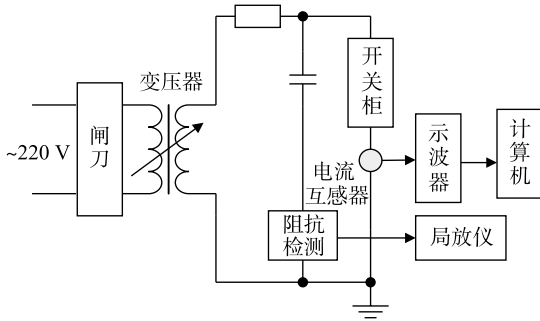


图 5 PD 实验原理

Fig.5 Schematic of PD experimental

实验时,在高压开关柜内部主要设置了针尖对平板和平板对平板两种故障类别。针尖对平板局放实验时,平板为 20×20 cm 的铜板,平板距离 8 cm。平板对平板局放实验时,平板大小 20×20 cm 铜板,针尖大小 0.1 cm,平板和针尖的距离 8 cm。平板同时对针尖和平板局放实验时,平板大小 20×20 cm,平板距离 8 cm,针尖为焊接在平板上的小突起,针尖大小 0.1 cm。调节变压器的输出电压,产生 PD 故障,不同类型的放电,调节的输出电压可能有所不同。通过信号采集系统采集电流互感器的输出电压,得到 PD 信号。

3.2 PD 故障特征量的提取

检测到信号的典型波形及其功率谱如图 6 所示。对比图 6(a)、(b)、(c) 的时域波形,可以看出正常波形和 PD 故障波形很相似,基本上无法区分。对比图(a)、(b)、(c) 的功率谱,可以看出正常时频率谱比较平均,发生 PD 故障时频谱上出现能量高峰。

为更直观的体现能量分布情况,把 0~5 MHz 整个频段划分为 10 等份,分别计算各频段内的功率,然后绘制条形图,如图 7 所示。

从图 7 可以看出:PD 故障信号功率谱的峰值主要出现在 1.3 MHz 和 2.7 MHz 附近。取该 1.0~1.5 MHz 和 2.5~3.0 MHz 两个频带的能量占比作为 PD 故障识别的特征量。

3.3 PD 故障特征向量数据集的建立

故障识别器的输入为特征向量 x ,输出识别结果 y 。选择信号在频段 1.0~1.5 MHz 上的功率作为特征量 x_1 ,频段 2.5~3.0 MHz 上的功率作为特征量 x_2 , x_1 和 x_2 组成特征向量 x 。通过 x 来识别是否发生 PD。识别结果 $y=1$ 表示发生 PD, $y=-1$ 表示没有发生 PD。

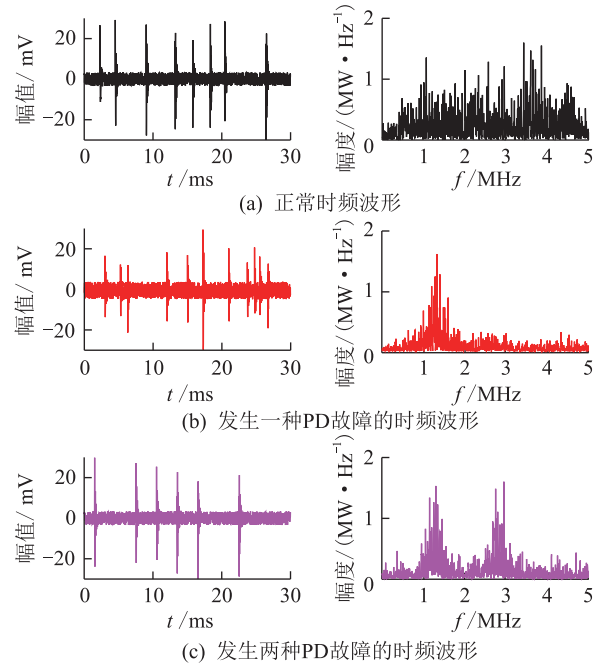


图 6 PD 信号时域和频域

Fig.6 Time and frequency domain of PD signals

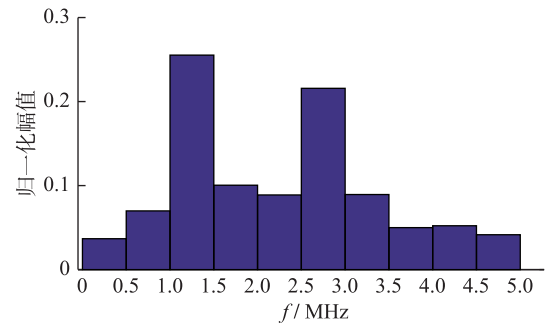


图 7 局放信号功率分布

Fig.7 Power distribution bar of PD signal

实验时,先调节好实验条件,然后使用 PD 信号测量分析系统采集实验数据,同时使用局放仪测量局放量。如果局放量大于 12 pC,则表示发生 PD,该段实验数据标记为 1,即 $y_i=1$ 。如果局放量小于 12 pC,则表示没有发生 PD,该段实验数据标记为 -1,即 $y_i=-1$ 。

采集 270 组时域数据,计算数据的功率谱,以条形图的形式计算各个频段内的功率占比并归一化,取 1.0~1.5 MHz 和 2.5~3.0 MHz 两个频段内的功率占比,建立故障识别特征量数据集,如表 1 所示。

3.4 PD 故障的识别

根据多次试验经验,LS-SVM 故障识别器选用 RBF 核函数,选取核参数 $\sigma^2=0.06$,惩罚因子 $C=3$ 。在表 1 中随机选取 200 组数据作为 LS-SVM 的训练数据,其余的 70 组数据作为测试数据。PD 故障识别结果如图 8 所示。

表 1 故障识别的特征量数据集

Tab.1 Characteristic data set for recognizing faults

序号 i	特征量 x_{1i}	特征量 x_{2i}	输出 y_i
1	0.270 066	0.561 216	1
2	0.185 605	0.600 180	-1
3	0.300 879	0.500 116	-1
⋮	⋮	⋮	⋮
269	0.172 618	0.612 614	-1
270	0.229 480	0.509 529	1

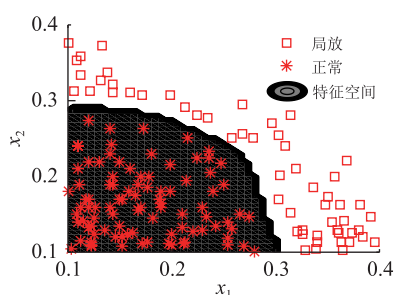


图 8 PD 故障识别结果

Fig.8 Result of PD fault identification

采用测试样本的数据对 LS-SVM 进行检验,如果样本落在正常区域则表示为没有发生 PD 故障,否则表示发生 PD 故障。经过实验证明,LS-SVM 对 70 组测试样本识别的正确率为 98.57%,预测效果良好。

3.5 PD 故障识别效果的比较

采用不同的滤波方法和不同的样本数量,其他条件相同,分别测试 PD 识别的正确滤波,实验结果如表 2 所示。

表 2 故障识别的正确率比较

Tab.2 Accuracy rate comparison of recognizing faults

序号 i	滤波方法	样本数/个	识别正确率/%
1	FRR	2000	98.5
2	FIR	2000	97.2
3	FRR	1000	98.1
4	FIR	1000	92.4

从表 2 可以看出:采样 ZPEF 可以提高故障的识别精度,当采样点较少时,这种优势更为明显。由此也可推测一个结论:如果要保持故障识别精度不变,采样 ZPEF 需要的采用点数更少,由此可以提高故障识别的速度。

4 结语

对 PD 信号进行 ZPEF 滤波可有效的滤除噪声,同时保持滤波前后信号的相位不变,从而保正滤波

后信号的功率谱的准确性。PD 故障通常伴随出现能量高峰,可以此为特征量判断是否发生 PD 故障。采用 ZPEF 滤波,可提高以功率分布为特征量的故障识别的准确性。对于样本数据点数少的情况下,ZPEF 的优势更明显。采用 LS-SVM 可以实现开关柜 PD 故障识别,故障识别率可达 98.5%。

参考文献:

- [1] HAQ S U, STRANGED M K W, WOOD B. A proposed method for establishing partial discharge acceptance limits on API 541 and 546 sacrificial test coils[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1):718-722.
- [2] 赵科,王静君,刘通,等.直流 GIL 绝缘设计及局部放电检测研究进展[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5):98-102,108.
ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, et al. A review of insulation design and partial discharge detection of DC gas insulated line [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5):98-102,108.
- [3] 霍天,吴振升,桂俊峰.高压开关柜局部放电声-电联合定位方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):62-66.
HUO Tian, WU Zhensheng, GUI Junfeng. Acoustic-electric joint localization method of PD in high voltage switch cabinet [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):62-66.
- [4] HEKMATI A, HEKMATI R. Optimum acoustic sensor placement for partial discharge allocation in transformers [J]. Iet Science Measurement & Technology, 2017, 11(5):581-589.
- [5] LI P, ZHOU W, YANG S, et al. Method for partial discharge localisation in air-insulated substations [J]. Iet Science Measurement & Technology, 2017, 11(3):331-338.
- [6] MONTANARI G C. Partial discharge detection in medium voltage and high voltage cables: maximum distance for detection, length of cable, and some answers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(5):41-46.
- [7] KANEGAMI M, MIYAZAKI S, MIYAKE K. Partial discharge detection with high-frequency band through resistance-temperature sensor of hydropower generator stator windings [J]. Electrical Engineering in Japan, 2016, 195(4):9-15.
- [8] HOU Z, LI H, SUN Z, et al. A novel sinusoidal damped oscillating voltage generator for the detection of partial discharge in MV distribution power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1):410-411.
- [9] XIE J, WANG Y, LV F, et al. Denoising of partial discharge signal using rapid sparse decomposition [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(11):2494-2512.
- [10] CASTRO B, CLERICE G, RAMOS C, et al. Partial discharge monitoring in power transformers using low-cost piezoelectric sensors[J]. Sensors, 2016, 16(8):1-16.
- [11] DAI D, WANG X, LONG J, et al. Feature extraction of GIS

- partial discharge signal based on S-transform and singular value decomposition [J]. *Iet Science Measurement & Technology*, 2017, 11(2):186-193.
- [12] LIU C, LI H, WANG J, et al. Optimal eigenvalue weighting detection for multi-antenna cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(4):2083-2096.
- [13] MOHAMMADI H, HAGHJOO F. Feasibility study for partial discharge detection and defective region identification in power transformers by using distributed sensors[J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 2016, 10(16):4006-4023.
- [14] JIAN W, CHEN M, MCFARLAND D J. EEG based zero-phase phase-locking value (PLV) and effects of spatial filtering during actual movement[J]. *Brain Research Bulletin*, 2017, 130:156-164.
- [15] ZHANG B, PAN J F, YUAN J, et al. Tracking control with zero phase-difference for linear switched reluctance machines network[J]. *Energies*, 2017, 10(7):949.
- [16] LEWIN P L, TRAN T N, SWAFFIELD D J, et al. Zero-phase filtering for lightning impulse evaluation: A K-factor Filter for the Revision of IEC60060-1 and-2[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1):3-12.
- [17] ANGELIDIS E. A recursive frequency-sampling method for designing zero-phase FIR filters by nonuniform samples [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 43(6):1461-1467.
- [18] 贾亚飞,朱永利,兰志堃,等. 基于 S 变换和深度置信网络的变压器局部放电模式识别[J]. *广东电力*, 2017, 30(1):108-115.
JIA Yafei, ZHU Yongli, LAN Zhikun, et al. Pattern recognition on partial discharge signals of transformers based on S-transform and deep belief network [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(1):108-115.
- [19] 纪跃波,秦树人. 零相位数字滤波器[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2000, 26(6):4-6.
JI Yuebo, QIN Shuren. Digital filtering with zero phase error [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2000, 26(6):4-6.
- [20] DAI D, WANG X, LONG J, et al. Feature extraction of GIS partial discharge signal based on S-transform and singular value decomposition [J]. *Iet Science Measurement & Technology*, 2017, 11(2):186-193.
- [21] KHAN Y, KHAN A A, BUDIMAN F N, et al. Partial discharge pattern analysis using support vector machine to estimate size and position of metallic particle adhering to spacer in GIS [J]. *Electric Power Systems Research*, 2014, 116(11):391-398.
- [22] SI L, QIAN Y, BAI W, et al. Pattern recognition of UHF partial discharge for GIS with support vector machine[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(11):1-6.
- [23] 徐卫东,聂一雄,彭丹,等. FFT 优化算法与小波分析在局部放电检测中的应用[J]. *广东电力*, 2017, 30(4):67-73.
XU Weidong, NIE Yixiong, PENG Dan, et al. Application of FFT optimization algorithm and wavelet analysis in partial discharge detection [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(4):67-73.

作者简介:



赖联有

赖联有(1975—),男,硕士,讲师,主要研究方向为故障检测、信号与信息处理(E-mail: kaikaixinlinly@163.com);

许伟坚(1974—),男,博士,讲师,主要研究方向为信号与信息处理、图像处理(E-mail: xucomma@163.com)。

Recognition of Partial Discharge Faults Using Zero Phase Error Filtering

LAI Lianyou, XU Weijian

(College of Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: There is a large noise signal in the partial discharge (PD) signal of the switch cabinet. The traditional FIR filter will cause the phase shift of the filtered signal. Thus, the correct rate of fault identification using power spectrum is considered. To solve the problem, a PD fault identification method using zero phase error filtering (ZPEF) method is proposed. Firstly, PD signals are collected by high speed current transformer. Then, ZPEF is used to filter the noise in the discharge signal. Secondly, the power spectrum of the discharge signal is analyzed by FFT transform. Two bands power spectra of 1.0~1.5 MHz and 2.5~3.0 MHz are used to construct the eigenvectors. Finally, least squares support vector machine (LS-SVM) is used to identify PD faults. Experimental results show that the recognition rate of PD fault can be improved by using ZPEF. A corollary is also drawn: ZPEF can improve the speed of fault identification by ensuring the same fault recognition rate.

Key words: partial discharge; fault identification; zero phase error filtering; support vector machines; switchgear

(编辑 钱悦)