

基于振动信号的 GIS 机械松动与局部放电诊断方法

屈 斌¹, 张 利¹, 王永宁³, 方 琼⁴, 臧 旭², 马宏忠², 陈 荣¹, 王小朋³

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;
3. 国网天津市电力公司检修公司, 天津 300232; 4. 国网天津市电力公司, 天津 300201)

摘 要:为诊断运行中气体绝缘组合电器(GIS)典型的机械松动与绝缘故障,搭建 GIS 故障模拟实验平台,模拟 GIS 的绝缘子松动、尖刺放电与悬浮颗粒物放电故障,采集不同故障形态下 GIS 振动加速度信号。利用改进集总平均经验模态分解(MEEMD)的方法对信号进行模态特征提取,将提取的模态特征进行希尔伯特黄变换(HHT),得到希尔伯特边缘谱。通过比较边缘谱中不同频率段振动信号能量大小,判别 GIS 发生机械松动或局部放电故障。再利用小波变换求得反映放电程度的放电因子,区别不同放电故障的特点。通过分析不同模拟实验下的实测数据,结果表明:上述方法能够对 GIS 进行故障诊断,反映局部放电程度并区分放电故障类型,为 GIS 的机械松动与绝缘故障诊断提供一种有用的方法与途径。

关 键 词:GIS;振动信号;HHT;MEEMD;小波变换;放电因子

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.012 中图分类号:TM595 文章编号:1673-9140(2021)02-0098-09

Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals

QU Bin¹, ZHANG Li¹, WANG Yongning³, FANG Qiong⁴, ZANG Xu²,
MA Hongzhong², CHEN Rong¹, WANG Xiaopeng³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Maintenance Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China; 4. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300201, China)

Abstract: In order to diagnose the typical mechanical looseness and insulation fault of gas insulated switchgear (GIS) in operation, this paper sets up experimental platform to simulate insulator loosenesses, tip discharges and suspended particle discharge faults. Acceleration signals of GIS vibration in different fault patterns are collected. Then the Hilbert marginal spectrum can be obtained by analyzing vibration signal using virtue of Hilbert-Huang transformation (HHT) after the modified ensemble empirical mode decomposition (MEEMD). The mechanical looseness or partial discharge of GIS can be judged through the energy of signals in different frequency bands. The wavelet transform is applied to calculate discharge factors, which reflects the characteristics of different types of partial discharge fault. Results obtained by experimental data analysis indicate that, the above methods can distinguish the faults of GIS and reflect the characteristics of partial discharge faults effectively. Thus providing a useful method for diagnosis of me-

收稿日期:2019-12-29;修回日期:2020-05-02

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ 19-1-19)

通信作者:臧 旭(1994-),男,硕士研究生,主要从事气体绝缘组合电器状态监测与故障诊断研究;E-mail:1977556118@qq.com

chanical looseness and insulation fault of GIS.

Key words: gas insulated switchgear(GIS); vibration signal; HHT; MEEMD; wavelet transform; discharge factor

随着气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)在电网中的大量投运,其故障问题也日益显露,影响着电网正常安全运行。为降低设备运行隐患,保证电力系统稳定运行,需要提出有效的方法对 GIS 的故障进行诊断。根据统计表明,GIS 的局部放电占全部故障的 40%以上,会破坏 GIS 绝缘引发导体发热及异常响动威胁设备正常运行^[1],特别是导体或腔体上尖刺放电以及 GIS 腔体内的自由金属颗粒引起的放电危害程度最为严重且是较为典型的绝缘性故障^[2]。GIS 的机械故障占到全部故障的 30%左右,其中绝缘子松动故障属于常见的机械故障^[3],松动故障会导致 GIS 设备发生异常振动,可能引发其他一次设备的机械故障如断路器与隔离开关的拒动与误动影响设备正常工作。

目前,对于 GIS 放电故障诊断常用的有特高频法、超声波法。特高频法主要通过检测局部放电辐射出的高频电磁波信号进行局部放电检测,但易受变电站高频信号与电晕放电干扰,会对检测结果造成一定影响^[4-5]。超声波法通过采集放电源附近高能粒子与气体分子撞击壳体产生的超声波信号,检测局部放电^[6]。

振动作为电气设备运行时的一个固有属性,在运行状态发生变化时,其振动情况必会产生变化,因此,可以用振动量进行电气设备的故障诊断。早在上世纪日本学者 Youichi Ohshita 通过实验分析了不同故障下的振动信号的频率特性,给出不同运行状态下的振动信号频率特征图,定性地说明了两两者间关系^[7-8]。1989 年,张雅林、郭碧红等学者开展了局部放电引发 GIS 外壳典型振动的研究^[9],西安交通大学杨景刚等学者研究了隔离开关接触不良及大电流作用下的振动信号特征,发现 GIS 外壳机械振动频率以 100 Hz 为主,若存在开关接触不良等机械缺陷,则振动信号中 200、300 Hz 分量幅值会显著增加^[10-11]。

该文对实际的 GIS 装置进行故障模拟,研究 GIS 在绝缘子松动、尖刺放电与悬浮颗粒物放电这 3 种典型故障下的振动特性,为避免模态分裂与模态混叠,对不同运行状态下的 GIS 设备振动信号进行改进集总平均经验模态分解,将信号分解为多个

频段的模态信号,利用 HHT 变换,求得模态信号的希尔伯特边缘谱,通过比较不同故障下边缘谱中不同频段能量的大小进行故障诊断。利用小波分解放电信号,计算局部放电时不同频段信号能量占比,求得放电因子大小,反映局部放电的特征,区别局部放电的故障类型。

1 基本理论

1.1 EEMD 分解原理

针对经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)存在模态混叠和虚假模态分量而影响分解准确性的问题,集总平均经验模态分解(ensemble EMD, EEMD)在待分解信号中添加一定幅值的高斯白噪声,提高信号的连续性,有效避免模态混淆,消除添加高斯白噪声对信号分解造成的干扰^[12],其具体过程如下:

1) 在原始信号 $s(t)$ 中加入幅值标准差为常数、均值为零的白噪声 $n(t)$;

2) 对含噪声的信号进行 EMD 分解,得到一组固有模态分量(IMF);

3) 重复步骤 1、2,总计 m 次,得到:

$$s(t) + n_k(t) \xrightarrow{\text{EMD}} \sum_{i=1}^m c_{i,k}(t) + r_k(t) \quad (1)$$

式中 $c_{i,k}(t)$ 为信号 $s(t)$ 第 k 次白噪声辅助 EMD 分解得到的第 i 个分量; $r_k(t)$ 为残余函数;

4) 将各组分量求解均值,得到 EEMD 分解结果:

$$c_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n c_{i,k}(t) \quad (2)$$

1.2 MEEMD 的基本原理

改进的 EEMD 方法(modified EEMD, MEEMD)是在原始信号中加入幅值和标准差一致但符号相反的 2 组白噪声,然后重复 EEMD 的分解过程。

1) 加入白噪声信号的均方根值接近待分析信号内部噪声或不高于 0.3 倍。

2) 加入符号相反的 2 组白噪声信号 $n(t)$,可有

效减少 EEMD 分解的残余分量^[13],过程为

$$s(t) + n(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_{i+}(t) \quad (3)$$

$$s(t) - n(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_{i-}(t) \quad (4)$$

其中, $c_{i+}(t)$ 、 $c_{i-}(t)$ 为分解得到的 2 组结果。

3) 将分解得到的 2 组结果中的对应分量平均:

$$c_i(t) = 0.5(c_{i+}(t) + c_{i-}(t)), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

即可在最大程度上消除白噪声的残余。

4) 由步骤 3 求得的 $c_i(t)$ 不一定是标准的 IMF 分量,可能存在模态分裂,需再对其进行 EMD 分解,即

$$c_1(t) \xrightarrow{\text{EMD}} d_1(t) + r_1(t) \quad (6)$$

$$c_k(t) + r_{k-1}(t) \xrightarrow{\text{EMD}} d_k(t) + r_k(t) \quad (7)$$

式中 $d_k(t)$ 为经过 EMD 分解后的模态分量; $r_k(t)$ 为残余分量;

5) 最终的 MEEMD 分解结果可描述为

$$s(t) \xrightarrow{\text{MEEMD}} \sum_{i=1}^m d_i(t) + r(t) \quad (8)$$

式中 $d_i(t)$ 为最终得到的本征模态函数; $r(t)$ 为残余分量。

1.3 边际谱函数

对 MEEMD 分解出的各个本征模态分量 IMF 运用 Hilbert 变换进行,进一步求得 Hilbert 时频谱^[14],若不计及残余函数 $r(t)$,则得到时频谱函数:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n d_i(t) e^{j[\omega_i(t) t]} \quad (9)$$

时频谱函数反映了信号幅值在频率—时间平面上的分布,实际上也反映了不同频段的能量分布。进一步求解出边际谱函数为

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega, t) dt \quad (10)$$

2 实验设置

2.1 实验目的

该文设计 GIS 典型的绝缘子松动故障实验,将绝缘子固定螺栓拧松后进行实验,研究机械松动故障的特点。尖刺放电是 GIS 常见的局部放电故障之一,此种故障是由于 GIS 内金属导体或外壳表面存在金属突出物导致^[15]。GIS 长期运行结果表明,

自由金属颗粒物放电对设备运行危害最大。长期运行的 GIS 由于振动或撞击等原因导致壳体内产生自由金属微粒,引发明显的局部放电^[16]。针对这 2 类典型的绝缘故障,该次实验设计针尖放电与自由金属颗粒物放电实验研究,研究局部放电故障特点。

2.2 GIS 故障模拟方法

基于华北电力大学高压实验室中实际的 GIS 设备,该文实验进行故障模拟并取得实际的实验数据,进行故障分析,现场实验如图 1 所示,GIS 为铝制设备,内导体外径为 70 mm,外壳外径为 375 mm,外壳厚度 8 mm,由调压器调节,采用电压分压器测量测试电压。GIS 状态检测系统由振动加速度传感器、HY-109A 振动信号采集仪、计算机终端组成,整体结构如图 2 所示。



图 1 现场实验实物

Figure 1 Field experiment objects

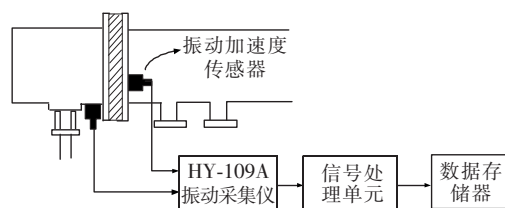


图 2 GIS 振动信号采集系统

Figure 2 GIS vibration signal acquisition system

通过振动加速度传感器与 HY-109A 振动信号采集仪采集与接收振动信号再送至 PC 终端,加速度传感器型号为 AC102-1A,其灵敏度为 100 mV/g,采样频率设置为 16 000 Hz。

为了更准确地了解尖端放电的特点,该次实验选用细、粗针各一种,细、粗针尖直径分别为 1.5、2.5 mm,分别在 15.9、17.6 kV 电压下进行尖端放电实验,针尖沿导杆径向固定于高压导杆上。

自由金属颗粒设计是在 GIS 腔体内,靠近法兰连接处的导体附近,分散放置多个圆形自由金属颗粒物,模拟 GIS 安装或长期运行时金属碎屑的脱落

导致的悬浮颗粒放电,逐步升高电压等级,观测 GIS 的放电与振动情况。

悬浮金属颗粒物放电时的相位特征如图 3 所示,尖刺放电时的相位特征如图 4 所示。悬浮电位导致放电在正、负两半周都很明显,而金属突出物产生的放电由于存在近阴极效应,主要发生在负半周,故此 2 种放电故障的特征差异较大,从而导致振动信号差异也较大,振动信号中不同频段的频率成分有差异^[17-18]。

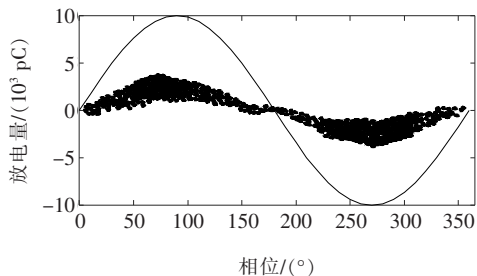


图 3 悬浮金属颗粒物放电相位特征

Figure 3 Discharge phase of characteristics of suspended metal particles

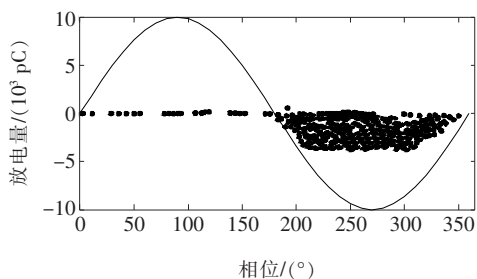


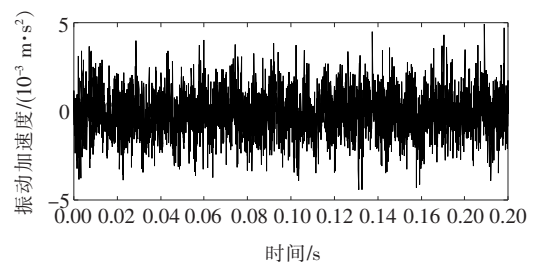
图 4 尖刺放电相位特征

Figure 4 Discharge phase of characteristics of metal protrusion

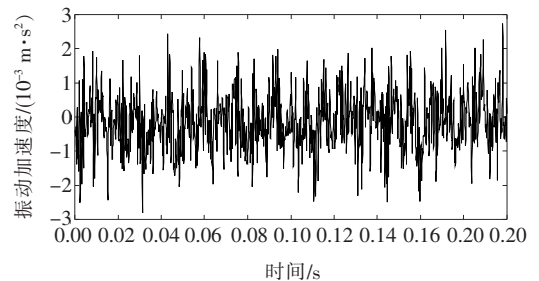
3 GIS 典型故障下振动信号分析

3.1 时域图分析

经过多次实验后得到的 GIS 正常运行、绝缘子松动以及发生局部放电这 3 种状态下的典型振动时域信号降噪处理后的波形分别如图 5~7 所示,可以看出,图 5~7 的时域图并没有明显的特征,从时域图中也不能辨识出 GIS 发生了哪一类故障,所以需要时域信号进一步处理,得到不同运行状态下的特征。



(a)滤波前



(b)滤波后

图 5 GIS 正常运行振动信号

Figure 5 Vibration signal of GIS normal operation

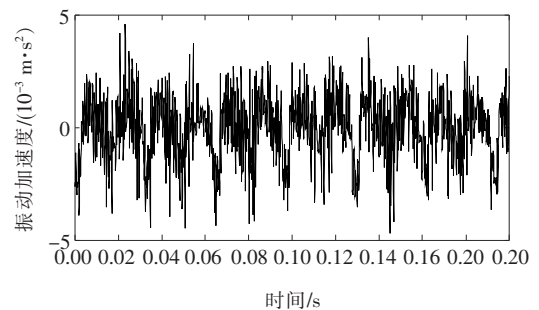


图 6 GIS 绝缘子松动时振动信号

Figure 6 Vibration signal of GIS insulator looseness

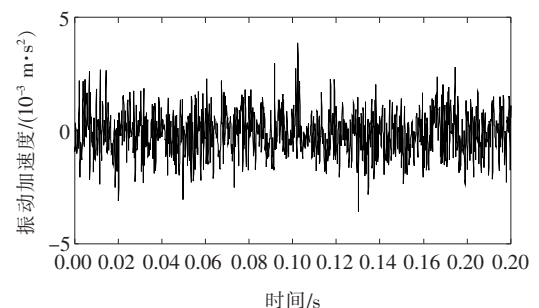


图 7 GIS 局部放电的振动信号

Figure 7 Vibration signal of GIS partial discharge

3.2 改进集总平均经验模态分解

将上述 GIS 在不同运行状态下的 3 种时域信号进行 MEEMD 分解后,得到本征和剩余模态分量,分别如图 8~10 所示。

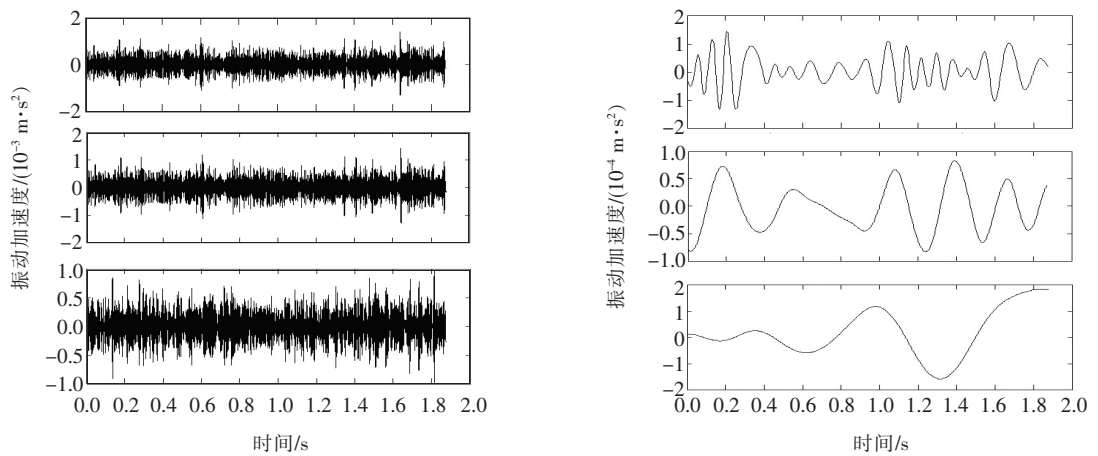


图 8 正常运行条件下的 MEEMD 分解

Figure 8 MEEMD decomposition of normal operating conditions

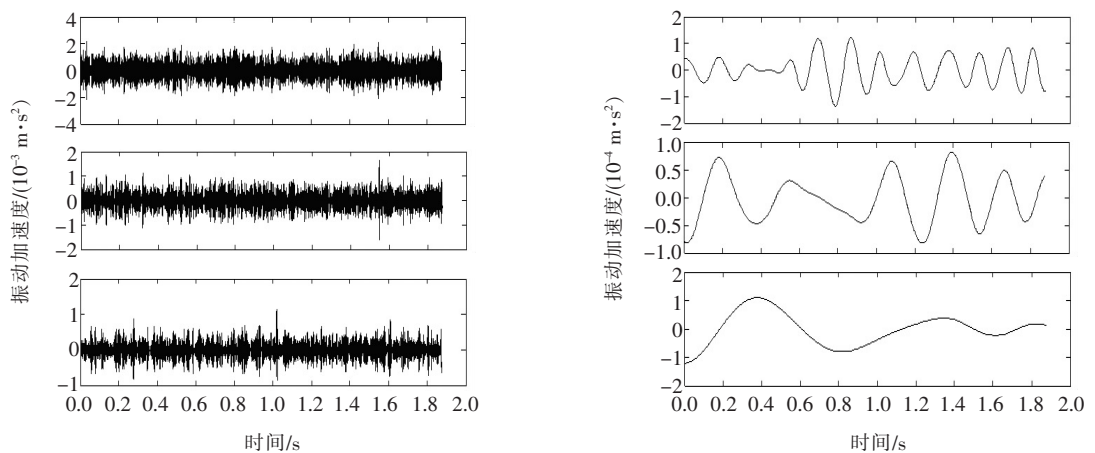


图 9 绝缘子松动下的 MEEMD 分解

Figure 9 MEEMD decomposition of insulator looseness

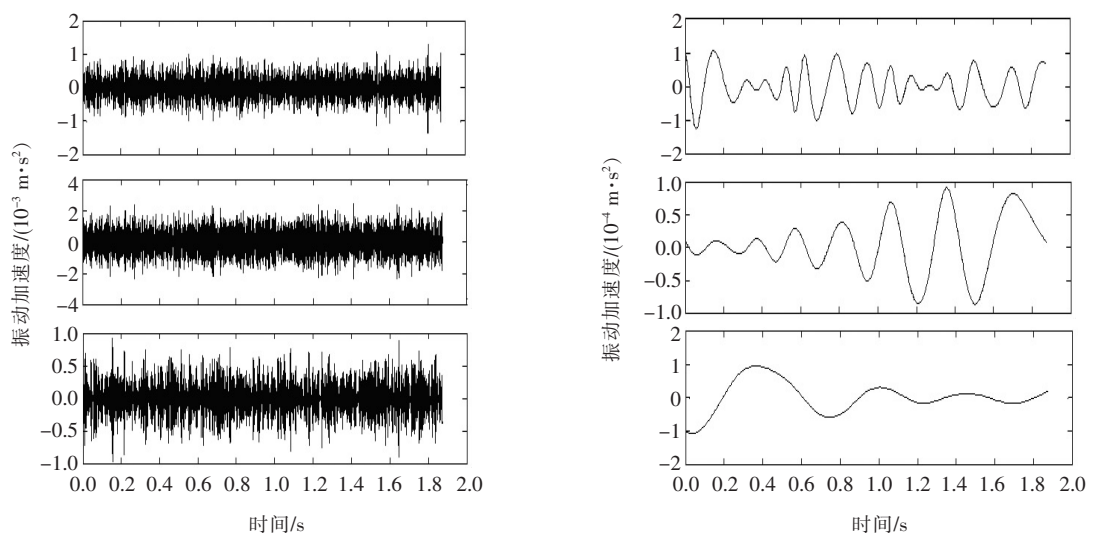


图 10 局部放电下的 MEEMD 分解

Figure 10 MEEMD decomposition of partial discharge

3.3 Hilbert 边际谱分析

由于 GIS 发生不同类型故障时其不同频段信

号的能量不同,所以先通过 MEEMD 将信号分解为

由高到低多个不同的模态函数,再通过分析其 Hil-

bert 变换后的边际谱,求出不同频段的信号幅值,对应上述 3 种状态即 GIS 正常运行状态,仅发生绝缘子松动故障和仅发生局部放电故障状态下的 Hilbert 边际谱分别如图 11~13 所示。

由图 11 可见,正常运行状态下边际谱中能量较大的成分主要在低频段,一般在 500 Hz 以内,其中以 100 Hz 倍频信号较为突出,200、300 Hz 信号也较为明显,其他频段能量较小;由图 12 可见,若发生机械故障如绝缘子松动故障,则在正常信号的基础上 1 000 Hz 内多个频段能量显著增加,如 200、300、

500 Hz 等频率信号能量明显高于正常运行时的能量,对于不同类型或不同程度的机械故障会导致 1 000 Hz 以内不同频段能量变化明显,但无论是正常还是机械故障,1 000 Hz 以上信号变化较小;由图 13 可见,当发生局部放电故障,边际谱中振动信号 1 000 Hz 以上频段能量会增加并且明显高于正常运行时该频段能量,1 000~2 000 Hz 频段能量显著增大,相比正常与机械故障时变化明显,从而判断很可能发生的是绝缘故障。因此,通过 MEEMD 分解后再对信号进行提取,能有效地区分 GIS 的运行状态并大致判定其发生故障类型。

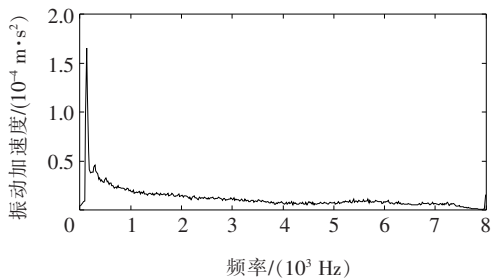


图 11 GIS 正常运行的振动信号边际谱

Figure 11 Marginal spectrum of vibration signal of normal operation of GIS

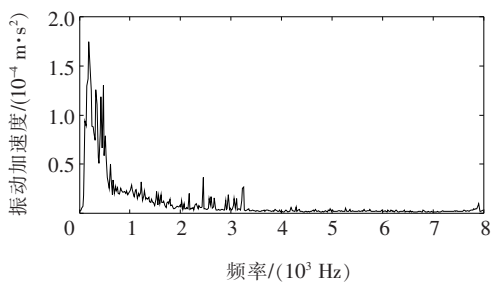


图 12 GIS 绝缘子松动的振动信号边际谱

Figure 12 Marginal spectrum of vibration signal for GIS insulator looseness

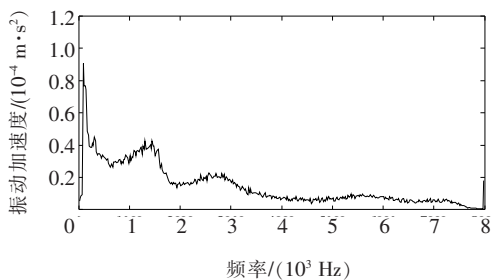


图 13 GIS 局部放电的振动信号边际谱

Figure 13 Marginal spectrum of vibration signal of GIS partial discharge

4 GIS 局部放电分析

对于发生局部放电故障的 GIS,如果不仅能判别其是否发生故障也能判定故障的严重程度或故障类型,就能为更进一步诊断 GIS 故障类别提供依据。对于局部放电故障,由于引起局部放电原因多,并且放电程度不相同,仅靠边际谱分析不能判断局部放电严重程度及放电类型。

4.1 小波变换

小波变换具有很好的时频局部化特性,通过将信号伸缩和平移等运算对信号进行多尺度细化分析,能够分离出信号并将信号进行重构,重构出低频到高频的多个频段信号^[19-20]。

将原始振动信号重构为多个频段不同信号后进一步计算出各频段信号的能量占比^[21-23],通过研究局部放电导致频段能量占比的变化对放电程度与放电原因进行研究。

4.2 GIS 放电分析

通过对振动信号进行小波变换,将振动信号重构为多个独立频段的信号,该次实验一共分解出了 D1~D7 及 A1 共 8 个频段信号,并研究各个频段信号的能量占比,振动信号分解层数与频段如表 1 所示。

引入放电因子 α 描述放电情况,放电因子为 1 000 Hz 以上的频段能量与 200 Hz 以内的频段能量之比,表达式为

$$\alpha = \frac{E(D1) + E(D2) + E(D3)}{E(A1) + E(D7)} \quad (11)$$

该次实验选取 5 种不同状态下的 GIS 振动信号进行放电因子的计算,即①15 kV 下正常运行;②35 kV 下正常运行;③15.9 kV 下发生细针尖类局部放电;④17.6 kV 下发生粗针尖类局部放电;⑤悬浮电位放电。对这 5 种工作状态下的振动信号进行小波变换后,求得各频段能量占比,如图 14 所示,并将计算结果列于表中,如表 2 所示。对 GIS 正常运行与放电状态下的各频段能量占比进行计算,求出放电因子,进而判断是否发生局部放电与可能的故障类型以及放电程度,放电因子 α 越大说明放电越严重,放电特征越明显。

表 1 分解层数与频段分布

Table 1 Decomposition layers and frequency distribution

序号	分解层	对应频段/Hz
1	A1	0~62.5
2	D7	62.5~125
3	D6	125~250
4	D5	250~500
5	D4	500~1 000
6	D3	1 000~2 000
7	D2	2 000~4 000
8	D1	4 000~8 000

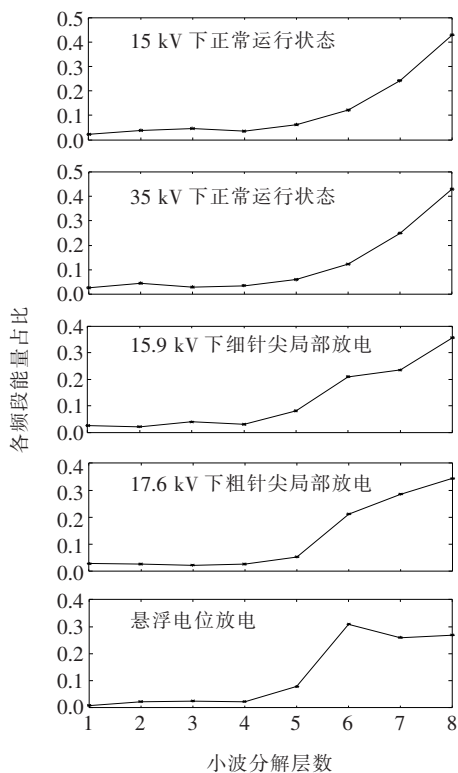


图 14 不同工况下各频段信号能量占比

Figure 14 Ratio of signal energy in each frequency band under different working conditions

表 2 GIS 放电频段能量分析

Table 2 Energy analysis of GIS discharge frequency band

分解层	不同状态下频段能量占比/%				
	15 kV 正常	35 kV 正常	15.9 kV 细针尖类	17.6 kV 粗针尖类	悬浮电位
A1	3.96	2.51	2.17	4.17	2.90
D7	2.62	4.30	3.15	2.03	1.50
D6	3.40	2.66	3.78	1.95	1.88
D5	3.51	3.80	3.08	2.73	2.49
D4	6.50	6.50	6.93	5.54	6.07
D3	12.27	12.77	18.09	22.46	21.82
D2	25.00	24.60	24.71	27.33	31.76
D1	43.00	42.80	38.09	33.79	31.58
α	12.199	11.772	15.204	13.480	19.350

从表 2 可以看出,对于正常运行情况,即使电压等级不同,放电因子 α 变化不大,一般都在某一数值附近变化;若发生了放电则放电因子变化明显且数值增大。由于悬浮电位导致的放电较为严重与剧烈,振动信号高频段的能量会显著增加,导致放电因子 α 增加更明显,对于悬浮金属颗粒物或悬浮电位导致的放电程度较为剧烈,放电因子较正常运行时大很多,尖刺类放电的剧烈程度相对轻微所以放电因子不会很大,只是较正常运行时有所增加,所以通过计算放电因子可以判断局部放电的程度,也能判别放电是否可能由悬浮电位或是金属突出物导致。

5 结语

该文基于实际 GIS 进行多种故障实验模拟与实际采集数据结果分析,得到以下实验结论。

1) 振动作为 GIS 设备运行时的一个固有属性可以通过振动加速度信号对 GIS 进行故障诊断。

2) MEEMD 法可以有效抑制模态混叠与模态分裂,能有效提取振动信号不同频率的成分信息,包括各个频段信号的幅值与相位。

3) 通过边际谱函数可准确反映振动信号中不同频率信号的能量,对于类似绝缘子松动类的机械故障,与放电故障相比,其边际谱中 1 000 Hz 内的能量普遍较高,但放电故障在 1 000 Hz 内能量变化不显著,在 1 000~4 000 Hz 内能量变化较大,故可依据边际谱函数中不同频段能量的变化对这 2 类故障

进行判断。

4)利用小波变换后不同频段能量占比,计算得到的放电因子 α 可用于判断放电严重程度,放电因子越大,局部放电越严重。对于不同电压等级正常运行的 GIS 放电因子变化较小,并且在某个值附近变化,对于悬浮电位引起的局部放电较为剧烈,其放电因子往往较大,通过计算放电因子可判断放电是由金属突出物还是悬浮电位所引发得。

该次实验是基于实际的 GIS 设备进行的故障实验,设置的放电故障也与现场运行的 GIS 可能发生的故障基本一致,因此具有一定的参考意义。该文提出的对 GIS 典型故障的特征提取方法是有效的,可以用于分析 GIS 的绝缘子松动与放电故障,同时,可通过放电因子判断放电的严重程度。但由于实验与现场实际情况存在一定差别,对于实际工程中的应用仍需要大量现场数据进行验证。

参考文献:

- [1] 王涛云,马宏忠,崔杨柳,等.基于模糊 Petri 网的 GIS 故障诊断与可靠性分析[J]. 电工电能新技术,2016,35(5):67-73.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Fault diagnosis and reliability analysis for GIS based on fuzzy Petri net[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2016,35(5):67-73.
- [2] 薛磊,柴琦,兀鹏越,等.一种高分辨率的便携式 GIS 局部放电检测装置[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1):149-153.
XUE Lei, CHAI Qi, WU Pengyue, et al. A high-resolution portable detection device of GIS partial discharge [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(1):149-153.
- [3] 朱明晓,薛建议,邵先军,等. GIS 局部放电特高频信号波形分析与特征参量提取[J]. 高电压技术,2017,43(12):4079-4087.
ZHU Mingxiao, XUE Jianyi, SHAO Xianjun, et al. Waveform analysis and feature extraction of partial discharge UHF signals in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering,2017,43(12):4079-4087.
- [4] 管敏渊,楼平,金国亮,等.基于希尔伯特—黄变换的 GIS 超声波检测异常信号诊断[J]. 高压电器,2019,55(6):23-30.
GUAN Mingyuan, LOU Ping, JIN Guoliang, et al. Fault diagnosis of GIS based on HHT of online ultrasonic detection signals [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 23-30.
- [5] 王彦博,朱明晓,邵先军,等.气体绝缘组合电器中局部放电特高频信号 S 参数特性仿真与实验研究[J]. 高电压技术,2018,44(1):234-240.
WANG Yanbo, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation and experimental research on S parameter characteristics of partial discharge UHF signals in GIS [J]. High Voltage Engineering,2018,44(1):234-240.
- [6] 齐伟强,陈柏超,袁佳歆,等.一种加载短路针的小型化气体绝缘组合电器内置特高频传感器[J]. 电工技术学报,2017,32(6):248-255.
QI Weiqiang, CHEN Baichao, YUAN Jiixin, et al. Needle load short circuit miniaturization of gas insulated switchgear ultra high frequency inside sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 248-255.
- [7] 张利,屈斌,王永宁,等. GIS 壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J]. 中国电力,2020,42(6):56-59.
ZHANG Li, QU Bin, WANG Yongning, et al. GIS shell vibration mechanism partial discharge optimization diagnosis [J]. Electric Power, 2020, 42(6): 56-59.
- [8] 李娟,李明,金子惠. GIS 设备局部放电缺陷诊断分析[J]. 高压电器,2014,50(10):85-90.
LI Juan, LI Ming, JIN Zihui. Some methods for diagnosis of GIS partial discharge defects [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 85-90.
- [9] 肖桂雨,向健平,凌永志,等.基于小波神经网络的风力发电机故障预测方法[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2):195-202.
XIAO Guiyu, XIANG Jianping, LING Yongzhi, et al. Prediction of wind turbine faults based on wavelet neural networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 195-202.
- [10] 刘媛,杨景刚,贾勇勇,等.基于振动原理的 GIS 隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术,2019,45(5):1591-1599.
LIU Yuan, YANG Jingang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnector based on mechanical vibration [J]. High Voltage Engi-

- neering, 2019, 45(5):1591-1599.
- [11] 郑旭,郝志勇,金阳,等. 基于 MEEMD 的内燃机辐射噪声贡献[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(5): 954-960.
ZHEN Xu, HAO Zhiyong, JIN Yang. Studying noise contributions of IC engine via MEEMD method[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(5):954-960.
- [12] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012:60-65.
- [13] 徐永干,冉恒,苟鑫. 基于广义 S 变换和 QPSO-SVM 的水电机组振动诊断方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 38-44.
XU Yonggan, RAN Hen, GOU Xin. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit based on generalized S transform and QPSO-SVM[J]. Smart Power, 2020, 48(2):38-44.
- [14] 李天辉,荣命哲,王小华,等. GIS 内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5483-5493.
LI Tianhui, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Design, optimization and experiment study of internal UHF sensor for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5483-5493.
- [15] 孔敏儒,陈怡,李文慧,等. 基于粒子群优化 PCA-LSSVM 算法的高压断路器机械故障诊断研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10):68-74.
KONG Mingru, CHEN Yi, LI Wenhui, et al. Research on mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on particle swarm optimization PCA-LSSVM[J]. Power System and Clean Energy 2019, 35(10):68-74.
- [16] 王磊,刘衍,冯宇,等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22):45-51.
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):45-51.
- [17] Ming R, Ming D, Zhigang X, et al. Partial discharge pulses at artificial protrusions in SF₆ under negative IEC60060-3 standard impulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 1070-9878.
- [18] 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.
- [19] 王先培,代荡荡,龙嘉川,等. 基于改进 Protrugram 和小波变换的超高频局部放电信号去噪方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(11):3577-3586.
WANG Xianpei, DAI Dangdang, LONG Jiachuan, et al. De-noising method of ultra-high frequency partial discharge signal based on improved protrugram and wavelet transform[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11):3577-3586.
- [20] 李伟,李山,公多虎,等. 550 kV 离相气体绝缘组合电器电磁环流建模计算与发热消缺措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(10):3289-3294.
LI Wei, LI Shan, GONG Duohu, et al. Electromagnetic circulation current and heating defect elimination method for 550 kV monophonic GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10):3289-3294.
- [21] 沈再阳. MATLAB 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012:75-80.
- [22] 高杰,谷雨,潘祎希,等. 基于经验小波变换和高频分量的微电网保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19):50-56.
GAO Jie, GU Yu, PAN Yixi, et al. A microgrid protection method based on an empirical wavelet transform and a high frequency component[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19):50-56.
- [23] 李圣清,王飞刚,朱晓青. 基于改进型小波神经网络的谐波检测方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 118-121.
LI Shengqing, WANG Feigang, ZHU Xiaoqing. Harmonic detection based on Improved Wavelet Neural Network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10):118-121.