

[输电线路]

基于声发射信号的绝缘子污秽检测分析

文/广东电网有限责任公司广州供电局 于映坤 刘智勇 陈彦廷 黄海生

研究了基于声发射技术的污秽绝缘子放电模式检测方法。利用FFT（傅里叶变化）的方法，对声信号进行分析，提取了不同放电模式声发射信号的幅值、平均功率及频率三大特征量，总结了特征量对应绝缘子污秽放电不同阶段的变化规律，为避免输电线路污闪事故的发生提供了理论和实践依据。

随着我国电网电压与容量等级的不断提高以及环境污染的日趋严重，绝缘子“污闪”事故不断发生，严重影响电网的安全和稳定运行。为了保证电网的安全稳定运行，检测绝缘子污秽程度，防止污闪事故的发生是运维部门一直关注的重点。目前，绝缘子污秽检测方法主要有等值盐密法（ESDD）、表面污层电导率法（SPLC）、泄漏电流法、红外成像法及紫外脉冲法等，上述方法在绝缘子污秽检测方面均有一定效果，但未能实质性解决绝缘子污秽检测的问题。本文提出了基于声发射信号对污秽绝缘子放电强度进行检测的方法，通过总结试验数据提取了电晕放电、

局部放电和电弧放电三个放电阶段的特征量，从而利用这种特征量判断绝缘子的外绝缘强度，并针对污闪制定了有效的预防措施与运维策略。

试验装置及试验方法简介

为获取污秽绝缘子不同放电阶段（以下称放电模式）的声发射信号。本文设计了如图1所示的污秽放电试验装置。试验装置主要有人工雾室、试验变压器和调压器等。试验变压器为额定容量1 000 kV·A的YOW-1000/250变压器，额定电压250/6 kV，额定电流250/6 A，阻抗电压1.77%。调压装置是一台TYDZ-1000/10型高压试验柱式

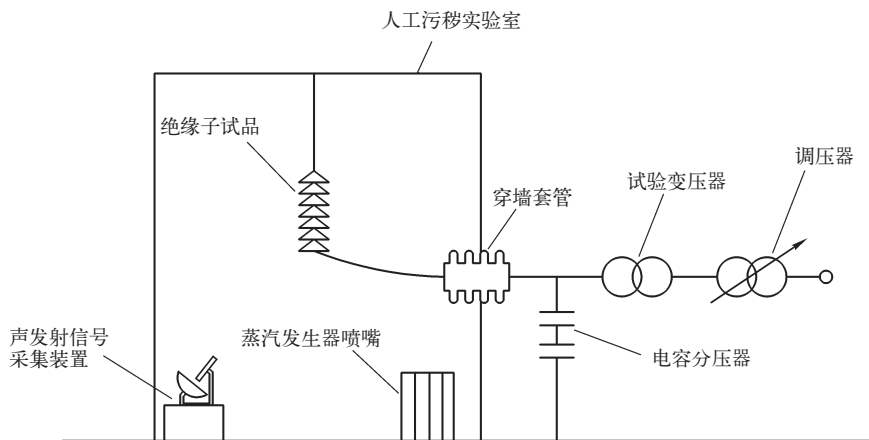


图1 绝缘子污秽试验接线图

调压器,额定容量为1 000 kV·A,输出电压范围0~6.3 kV,额定输入电流101 A,额定输出电流159 A,负载功率因数 $\cos\varphi=0.1$ 。声信号监测装置的接收声信号频率范围10 Hz~20 kHz,A/D转换采样率为100 kHz。

雾室为长方形,高度为15 m,长10 m,宽8 m。试品悬挂在雾室中央,试验电压经穿墙套管从室外的试验变压器引入。使用一个大功率的电热炉给水加热产生水蒸气,水蒸气通过喷嘴进入雾室,加热约10 min后水蒸气充满整个雾室,就产生了人工雾。

试验结果及分析

污秽放电试验采用耐受法。试验时,将涂有不同盐密/灰密、不同材质及不同型号的污秽绝缘子置入雾室,然后施加额定电压,喷射蒸汽使雾室蒸汽逐渐达到饱和状态,此时,污秽绝缘子将会出现电晕放电、局部放电以及电弧放电,并产生相应的声发射信号。利用所研制的声发射信号检测装置,采集绝缘子污秽发展过程中不同模式的声发射信号,并且对不同放电模式的声发射信号进行标记,使得不同放电模式与所产生得声发射信号一一对应。试验试品为U70BP/146D型的玻璃绝缘子和XWP-70型的陶瓷绝缘子,如表1所示。

表1 电动机与变压器匹配

试验电压/kV	材质	型号	盐密/灰密/(mg/cm ²)
110	玻璃	U70BP/146D	0.1/1.0、0.3/1.0
110	陶瓷	XWP-70	0.1/1.0、0.3/1.0

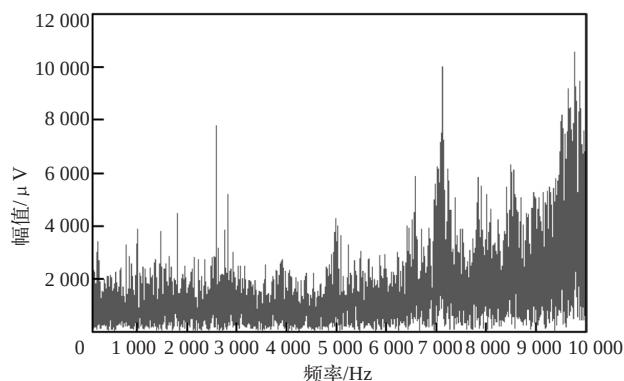
1. 典型污闪放电阶段分析

瓷绝缘子污秽放电试验选取的试品为盐密0.1 mg/cm²、灰密1.0 mg/cm²的普通型瓷绝缘子串(型号:XWP-70)污秽放电过程中检测到的污秽放电声发射信号波形。其中,试品型号为XWP-70共7片,雾室温度为35℃,相对湿度为96%。

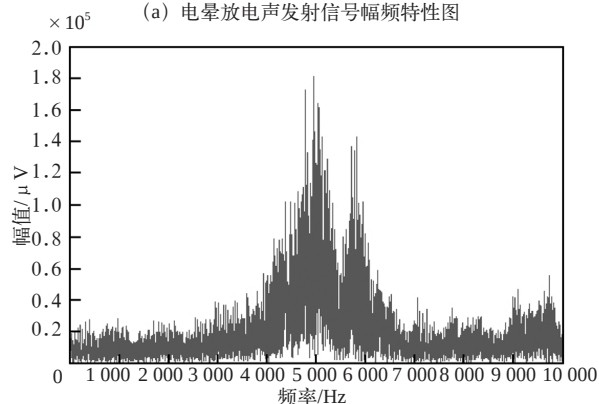
通过总结所选取的玻璃绝缘子及陶瓷绝缘子在不同污秽条件下的波形可知:在污秽放电较弱时,声信号幅值较小,能量(工频周期最大包络线面积,以下称能量)也较小;当污秽放电逐渐增强时,声信号幅值增大,能量也随之增大,大信号持续出现的工频周期数增大;当放电很强即将发生闪络时,声信号幅值和能量均达到最大值,且声音信号可以持续出现十几个工频周期以上。

1. 声发射信号能量特征量的提取

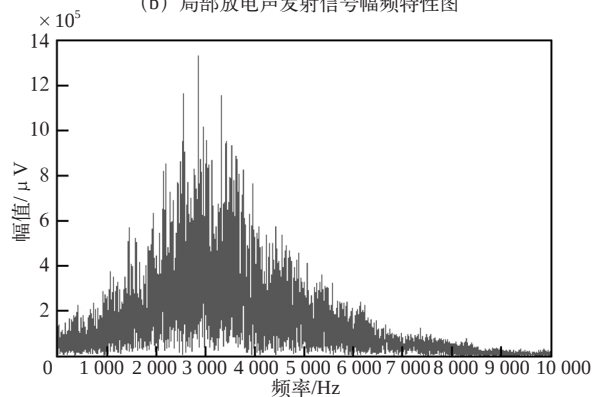
快速傅里叶变换(FFT)是1965年由J.W.Cooley和J.W.Tukey在离散傅里叶变换的基础上,利用因子的对称性和周期性所构造的一种快速的离散傅里叶变换算法。采用这种算法使计算离散傅里叶变换所需要的乘法次数大为减少,而且抽样点数 N 越多,该算法的计算量就越小。在计算有限时长序列信号的频率谱时,可以通过离散傅里叶变换将其频域进行离散化,获取有限长序列。利用FFT方法,计算污秽放电试验中取得的声发射信号的频率成分。三种不同放电模式下的声发射信号幅频特性图如图2所示。



(a) 电晕放电声发射信号幅频特性图



(b) 局部放电声发射信号幅频特性图



(c) 电弧放电声发射信号幅频特性图

图2 三种放电模式下的声发射信号幅频特性图

本文通过提取发射信号的幅值、能量及频率等三个特征量，作为辨识绝缘子污秽放电模式，以及放电程度的判别标准。

(1) 电晕放电声发射信号特征值

在试验电压110 kV的条件下，电晕放电声发射信号特征值的计算结果如表2所示。由表2可以看出，电晕声发射波形的电压幅值比较平稳且变化不大，在60 mV左右波动，频率也有起伏，约在9~20 kHz范围，平均值约为14.8 kHz，平均功率也较小。根据大量试验数据分析结果的统计，电晕放电声发射信号波形的幅值都在100 mV左右，频率约为15 kHz左右，平均功率较低。

表2 绝缘子电晕放电声信号特征值

组数	幅值/mV	频率/Hz	平均功率
1	60	9 564	11
2	58	19 041	11
3	61	12 564	11
4	55	16 596	10
5	57	15 918	10
6	56	15 553	10
7	52	20 488	9
8	63	12 564	11
9	62	9 611	12
10	58	16 500	10
平均值	58.2	14 840	10.5

(2) 局部放电声发射信号特征值

在试验电压110 kV的条件下，局部放电声发射信号特征值的计算结果如表3所示。由表3可以看出，局部放电声发射波形的幅值均在600 mV以上。局部放电声发射的信号频率在12 kHz左右。平均功率明显高于电晕放电。根据大量试验数据分析结果的统计，局部放电声发射信号波形的幅值在1 000 mV左右，频率的平均值约为12 kHz左右，平均功率在150左右。

表4 绝缘子局部放电声信号特征值

组数	幅值/mV	频率/Hz	平均功率
1	1 095	10 139	173
2	966	11 573	136
3	902	11 805	113
4	1124	13 488	149
5	987	12 971	122
6	1 051	11 506	165
7	1 186	13 146	172
8	971	11 540	149
9	642	12 823	98
10	847	11 844	150
平均值	977.1	12083.5	142.7

(3) 电弧放电声发射信号特征值

在试验电压110 kV的条件下，电弧放电声发射信号特征值的计算结果如表3所示。由表3可以看出，电弧放电声发射波形的幅值均在1000 mV以上。电弧放电声发射的信号频率在10 kHz以下。平均功率明显高于局部放电。根据大量试验数据分析结果的统计，电弧放电声发射信号波形的幅值在1 500 mV左右，频率的平均值在8 kHz左右。平均功率在500左右。

表4 绝缘子污秽放电电弧放电信号特征值

组数	幅值/mV	频率/Hz	平均功率
1	1 079	9 311	489
2	1 655	8 920	375
3	1 312	6 729	590
4	1 669	8 383	491
5	1 774	8 521	694
6	1 592	7 732	491
7	1 764	9 693	567
8	1 208	6 984	404
9	1 759	8 549	483
10	2 018	9 315	406
平均值	1 583	8 413	499

3. 绝缘子污秽放电声发射信号的分析

通过对不同盐密/灰密、不同材质和型号的绝缘子串进行的大量污秽放电试验，获取了不同放电模式声发射信号波形及相关数据。对绝缘子污秽放电声发射信号从波形特点、幅值、能量及主频率几个方面进行了分析，不同绝缘子污秽放电模式声发射信号具有以下规律和特点。

1) 在污秽放电初始阶段，污秽放电声发射信号的幅值相对较小，声发射信号持续的时间短。随着污秽放电增强，声信号幅值增大，持续的时间增长，且声发射信号脉冲出现的频度增加；严重放电时，放电声发射信号基本连续。

2) 绝缘子污秽放电声发射的能量随着污秽放电能量增加而增大。

3) 污秽放电声发射信号主频率与绝缘子污秽放电能量之间存在相关性。虽然不同绝缘子污秽放电模式之间声发射信号的主频率互有交错，但污秽放电声发射信号的主频率随污秽放电能量的增强，总体下降的趋势是明显的。

4) 对不同材质、不同型号及不同盐密/灰密的绝缘子污秽放电声发射信号波形分析比较可知，在相同的环境、湿度等试验条件下，污秽度轻的绝缘子整个放电发展的各阶段，其放电能量均低于污秽度重的绝缘子放电能量，对应的绝缘子污秽放电声发射信号的幅值、能量及主频率具有相同的变化规律。

结束语

本文通过将声发射技术引入绝缘子污秽放电

(下转第58页)

算例分析

1. 相关参数

某开发区分为3个网格，分别为榭西网格、榭北网格与榭南网格。其中榭南网格主供电源为35 kV长墩变电所与110 kV大树变电所，现状总负荷为10.6 MW。据预测，2025年区域负荷为30.12 MW，远景负荷为45.2 MW。根据负荷预测结果，计划于2025年新建110 kV榭东变电所，35 kV长墩变电所退出运行，如图2所示。

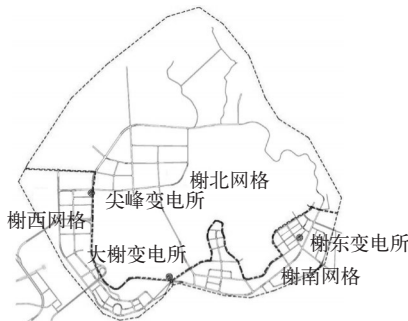


图2 规划电源布点

2. 主变压器选型

榭东变电所可选31.5 MW、40 MW和50 MW几种主变压器类型，不同方案负载率对比如表2所示。

表2 各方案负载率对比

方案名称	远景 饱和负荷 /MW	新建 变电站时 负载率(%)	饱和 负载率 (%)	容载比
方案1	22.6	25.16	37.76	2.79
方案2	22.6	19.82	29.74	3.54
方案3	22.6	15.85	23.79	4.42

再进行经济性比较，投资估算如表3所示。

表3 到远景年投资费用对比

(单位：万元)

对比项	方案1	方案2	方案3
初始投资费用	4 132	4 333	4 570
扩建费用	—	—	—
年运行费用	31	33	35
年维护费用	41	43	46
设备残值	331	347	366
总费用	5 601	5 886	6 229

由以上分析可知，方案1（2×31.5 MV·A）设备利用率更高且更具经济性，为推荐方案。

结束语

提出了基于变压器全寿命周期成本的主变压器选型策略，给出了不同负载率、不同容量主变压器的年运行费用计算方法，结合具体算例对某新建变电站所需变压器进行了优化选型，选型结果综合考虑了经济、设备利用率因素。

在远景饱和负荷小的新城区，或由于分布式光伏接入导致的负荷小的老城区，变电站改造时，可适当减小变电站主变压器容量，提高设备利用率，降低建设投资。EA

(收稿日期：2020.03.05)

(编辑：朱金凤)

(上接第55页)

在线监测领域，搭建了典型的声发射信号试验平台，并利用FFT方法对所测得的声发射信号进行分析，可以得到以下结论：

1) 通过试验平台定性的试验，可以发现绝缘子污闪的声发射信号主要分为三个阶段：电晕放电、局部放电和弧光放电。

2) 通过FFT方法对绝缘子污闪不同阶段的声发射信号进行分析，可以提取出具有代表性的绝缘子污闪的声发射特征值：幅值、能量及频率。

3) 通过对幅值、能量及频率的定性分析发现绝缘子污闪的不同阶段，特征值具有特定的变化规律：绝缘子污秽放电声发射的能量随着污秽放电能量增加而增大；污秽放电声发射信号主频率与绝缘子污秽放电能量之间存在相关性；在相同的环境、湿度等试验条件下，污秽度轻的绝缘子整个放电发展的各阶段，其放电能量均低于污秽度重的绝缘子放电能量。EA

(收稿日期：2020.03.15)

(编辑：朱金凤)