

Analysis of the Leakage Current High-Frequency Characteristics of Insulator under Fog and Haze Based on TLS-ESPRIT Algorithm

Ning Bian, Yunzhi Xu

School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: ningbian123@hotmail.com

Received: Jun. 14th, 2017; accepted: Jun. 27th, 2017; published: Jun. 30th, 2017

Abstract

Fog and haze weathers appear frequently in recent years in China due to atmosphere pollution. Insulator under fog and haze is functioning in extremely poor condition, and the possibility of flash over accident is greatly increased. In order to study the impact of fog and haze on the performance of insulator, this paper simulated a fog and haze environment caused by coal burning and automobile exhaust, and tested leak current under different conditions. TLS-ESPRIT is applied, and frequency characteristics of leakage current is compared between clean insulator, insulator with clear-fog, insulator with mainly sulfate fog and mainly nitrate fog. Leak current is increased if insulator is polluted by salt solution. Gaussian fitting showed that nitrate condition has peak frequency at $f_1 = 1.318$ MHz and $f_2 = 1.468$ MHz, while sulfate condition has peak frequency at $f_1 = 0.199$ MHz, $f_2 = 0.266$ MHz, $f_3 = 0.498$ MHz, $f_4 = 0.603$ MHz. Nitrate condition has higher peak frequency due to differences in ion mobility and quantity of electric charge.

Keywords

Fog-Haze, Insulator, Leakage Current, High-Frequency, TLS-ESPRIT

基于TLS-ESPRIT算法的雾霾影响下的绝缘子泄漏电流高频特性的分析

边宁, 许允之

中国矿业大学, 信息与控制工程学院, 江苏 徐州
Email: ningbian123@hotmail.com

文章引用: 边宁, 许允之. 基于 TLS-ESPRIT 算法的雾霾影响下的绝缘子泄漏电流高频特性的分析[J]. 输配电工程与技术, 2017, 6(2): 24-33. <https://doi.org/10.12677/tdet.2017.62004>

收稿日期: 2017年6月14日; 录用日期: 2017年6月27日; 发布日期: 2017年6月30日

摘要

近年来, 大气污染的日趋严重导致雾霾天气在中国频繁出现。雾霾影响中的绝缘子处于极为不利的运行状态, 闪络事故发生的可能性大大增加。为研究雾霾天气对绝缘子运行造成的影响, 本文模拟了燃煤和汽车尾气导致的雾霾环境, 测量了在不同雾霾成分作用下绝缘子表面的泄漏电流。采用TLS-ESPRIT算法分析, 比较了无污秽、清洁雾喷淋的污秽绝缘子、以硝酸盐为主和以硫酸盐为主的污雾喷淋的污秽绝缘子泄漏电流高频段的频率特性。当绝缘子表面被盐溶液污染时, 泄漏电流的幅值更大。高斯拟合结果显示, 以硝酸盐为主的情况的幅频特性分别在 $f_1 = 1.318$ MHz和 $f_2 = 1.468$ MHz频率处存在峰值, 以硫酸盐为主的情况的幅频特性在 $f_1 = 0.199$ MHz、 $f_2 = 0.266$ MHz、 $f_3 = 0.498$ MHz、 $f_4 = 0.603$ MHz频率处存在峰值。由于离子淌度和电荷量不同, 以硝酸盐为主的情况峰值频率较高, 表示泄漏电流能量更大。

关键词

雾霾, 绝缘子, 泄漏电流, 高频, TLS-ESPRIT

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

绝缘子普遍地被应用于电力系统中, 是各种各级输变电系统中不可缺少的构成部分[1]。至2009年末, 我国66 kV及以上交流系统和 ± 500 kV及以上直流系统中, 共使用22,960万片绝缘子[2]。据统计, 对绝缘子可靠运行造成风险的事故有雷击闪络、污闪、雨闪、鸟粪闪络、冰闪、操作冲击闪络等。雷击闪络虽然造成的事故次数较多, 然而其重合闸成功率高达90%, 污闪之后的重合闸成功率仅10% [3] [4] [5] [6]。近些年来, 我国环境污染问题逐渐凸显, 以大气污染尤为严重。以北京为例, 2015年全年空气质量达标186天, 占比仅51%; 然而, 重度雾霾天数达42天。严重的大气污染问题, 不仅严重影响到了人们的日常生活和身体健康, 也对绝缘子的运行状态更为恶劣, 污闪事故发生的可能性大为增加。因此, 对雾霾影响下绝缘子工作状况的研究是极为必要的[7] [8] [9] [10] [11]。本文模拟了雾霾环境中的绝缘子的运行情况, 采用TLS-ESPRIT算法分析泄漏电流频率特性, 比较了无污秽绝缘子、清洁雾喷淋的污秽绝缘子、以硫酸盐为主的污雾喷淋的污秽绝缘子和以硫酸盐为主的污雾喷淋的污秽绝缘子泄漏电流高频段的频率特性。

2. 雾霾对绝缘子特性的影响

2.1. 雾霾的成因

雾霾包括雾和霾, 表示两种气象现象, 常见于气候干冷、气流流动较弱之时。雾是一种自然界中的正常现象, 与空气污染关系较小, 而雾霾是人为向大气中排放污染物和利于霾出现的气象条件共同作用下出现的。气象学界一般以湿度作为雾和雾霾二者的区别依据, 当相对湿度 $< 80\%$ 时称之为霾, 相对湿

度 > 90%时称之为雾[12]。

雾通常出现于接近下垫面的大气中, 当气温急速下降时, 空气的水汽饱和量下降从而形成雾。雾大多发生在低空大气风速较小, 气流流动较为平稳的时候, 此时水汽不容易扩散, 更利于雾的形成。

大气气溶胶浓度较高直接导致了霾的形成。气溶胶是大气中固体与液体颗粒的总称。一定温湿和风速条件下, 气溶胶在低空不断积累, 形成霾。

2.2. 雾霾的成分和模拟方法

因为各地大气环境的不同, 雾霾的组分极为复杂, 雾霾的仿真也很难与实际情况完全相同。总的来说, 雾霾是一个固体和液体的复合物。固体成分主要是直径为 μm 级的固体颗粒, 有沙尘、煤灰、铁粉、石灰等, 而液体成分是雾水。雾水并非单纯的冷凝水, 而是含有大量的离子, 其酸碱性并不一定是中性的, 很有可能受到大气污染的影响而呈现酸性[13]。

对于雾霾的仿真方式, 通常有全模拟法和主成分法。全模拟法适用于以北京为代表的污染较为严重的北方地区, 雾水中含有的离子成分有: SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} , 根据污染的严重程度雾水电导率可分为中、重两种; 主成分法适用于以上海为代表的工业发达的东南沿海地区, 雾水中的离子成分有 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , 两种离子的配比可按照模拟的要求来选择, 一种以 NO_3^- 为主, $\text{NO}_3^-:\text{SO}_4^{2-}=16:1$, 用以突出汽车排放尾气污染, 另一种则以 SO_4^{2-} 为主, $\text{NO}_3^-:\text{SO}_4^{2-}=1:16$, 侧重于燃煤造成的大气中的硫化物[14]。

2.3. 雾霾对绝缘子的影响

雾霾中含有大量的固态颗粒, 在雾霾持续的时间段内, 绝缘子的表面会沉积固态颗粒物, 表面盐密和灰密均会有一定程度的增加。雾霾中的雾水与洁净的清洁雾不同, 含有大量离子并且可能呈酸性。在这种酸性的、含有大量离子的雾霾雾水的影响下, 绝缘子外表面的污秽层在受潮时, 污秽物的溶解会加强, 湿润污层的导电性会增加, 泄漏电流更大污闪发生的可能性更大, 污闪电压也会大幅降低[15] [16]。

3. 实验设置

实验采用的绝缘子为玻璃绝缘子, 型号为 U160FC02, 绝缘子串共有 8 片绝缘子。试验电源符合《IEC 60507-1991 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》中对试验电源的要求。

实验步骤如下:

- 1) 在实验进行之前, 先要对实验用绝缘子串进行清洗和干燥处理。仔细、彻底地漂洗绝缘子表面, 去除表面沾染的油脂和污物。清洗干净后悬挂起来, 待其自然干燥后用于试验。
- 2) 采用定量涂刷法将硅藻土和氯化钠的复合物涂刷在洁净绝缘子表面, 设定表面污秽程度为重度污秽, 等值盐密和灰密分别为 $\text{ESDD} = 0.2 \text{ mg/cm}^2$, $\text{NSDD} = 2 \text{ mg/cm}^2$ 。
- 3) 实验分为四组, 每组实验用于喷淋绝缘子表面污秽层的雾水成分不同, 每组的组分如表 1 所示。
- 4) 按实验接线图接线。
- 5) 加压方法为恒压法, 施加恒定 40kV 电压。
- 6) 测量各组的泄漏电流。

4. TLS-ESPRIT 算法原理

4.1. ESPRIT 算法

ESPRIT 算法是空间谱估计中子空间不变类算法的一种, 在 1986 年由 Roy 等人提出[17], 算法计算

Table 1. Experimental groups fog ingredient
表 1. 实验各组雾水成分

组号	雾水成分
1	无
2	蒸馏水
3	MgSO ₄ : NaNO ₃ = 16:1 的溶液
4	MgSO ₄ : NaNO ₃ = 1:16 的溶液

量小, 无须进行谱峰搜索, 在电力工程中得到了广泛应用。聂永辉等人将这个算法应用于电力系统谐波检测, 黄文辉等人在输电线路暂态保护频率分析中应用了这个算法[18] [19] [20]。本文将这个算法应用于绝缘子人工污秽试验泄漏电流高频特性的分析。

考虑信号

$$x(n) = \sum_{i=1}^p s_i(n) e^{j\omega_i n} + m(n)$$

其中 $s_i(n)$ 和 $\omega_i(n)$ 为第 i 个成分波的幅度和频率, $m(n)$ 是以随机数代表的白噪声序列。

取 $m > p$, 定义 $y(n) = x(n+1)$, $X(n) = [x(n), x(n+1), \dots, x(n+m-1)]^T$,
 $Y(n) = [x(n+1), x(n+2), \dots, x(n+m)]^T$, 故 $Y(n)$ 可看作 $x(n)$ 的平移结果。

$X(n)$ 的自相关矩阵为

$$R_{xx} = E\{X(n)X^H(n)\} = APA^H + \sigma^2 I$$

其中 $P = E\{s(n)s^H(n)\}$ 。 $X(n)$ 和 $Y(n)$ 的互相关矩阵为

$$R_{xy} = E\{X(n)Y^H(n)\} = AP\phi^H A^H + \sigma^2 Z$$

其中 $\sigma^2 Z = E\{\omega(n)\omega^H(n+1)\}$, $\phi = \text{diag}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}, \dots, e^{j\omega_p})$ 。 Z 是一个 $m \times m$ 的特殊矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & & & 0 \\ 1 & 0 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

ϕ 将 $X(n)$ 和 $Y(n)$ 联系在一起, 被称为旋转算符。

由此可知,

$$R_{xx} = \begin{bmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}^*(1) & \dots & R_{xx}^*(m-1) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & \dots & R_{xx}^*(m-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{xx}(m-1) & R_{xx}(m-1) & \dots & R_{xx}(0) \end{bmatrix}$$

$$R_{xy} = \begin{bmatrix} R_{xx}^*(1) & R_{xx}^*(2) & \dots & R_{xx}^*(m) \\ R_{xx}(0) & R_{xx}^*(1) & \dots & R_{xx}^*(m-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{xx}(m-2) & R_{xx}(m-3) & \dots & R_{xx}^*(1) \end{bmatrix}$$

对 R_{xx} 进行特征值分解, 获得其最小特征值 $\lambda_{\min} = \sigma^2$, 构造矩阵对 $\{C_{xx}, C_{xy}\}$,

$$\begin{aligned} C_{xx} &= R_{xx} - \lambda_{\min} I = R_{xx} - \sigma^2 I = APA^H \\ C_{xy} &= R_{xy} - \lambda_{\min} Z = R_{xy} - \sigma^2 Z = AP\phi S^H. \end{aligned}$$

对 $\{C_{xx}, C_{xy}\}$ 进行广义特征值分解

$$C_{xx}u = \gamma C_{xy}u$$

则 γ 和 u 为 $\{C_{xx}, C_{xy}\}$ 的广义特征值和广义特征向量。构造广义特征值矩阵 Γ , 则有

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \phi & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

即矩阵 Γ 的非零元素是旋转矩阵 ϕ , 通过矩阵 Γ 可求得 $x(n)$ 中各分量的频率。

4.2. TLS-ESPRIT 算法

基本 ESPRIT 方法可以看做一种最小二乘算子, 在广义特征值运算时会出现一些计算上的问题。奇异值分解(SVD)和总体最小二乘(TLS)可有效地解决此困难。

考虑 $\{R_1, R_2\}$ 的广义特征值分解, 设 R_1 的奇异值分解为

$$R_1 - U\Sigma V^H = [U_1, U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^H \\ V_2^H \end{bmatrix}$$

其中 Σ_1 由 p 个主奇异值组成。可用 U_1^H 左乘、 V_1 右乘矩阵 $R_1 - \gamma R_2$, 得到 $\Sigma_1 - \gamma U_1^H R_2 V_1$ 。原高维($m \times m$)的矩阵对广义特征值分解问题转换为比较低维($p \times p$)分解问题。

4.3. TLS-ESPRIT 算法的执行步骤

- ① 矩阵特征值分解得到 R_{xx}
- ② 计算 $C_{xx} = R_{xx} - \lambda_{\min} I = R_{xx} - \sigma^2 I = APA^H, C_{xy} = R_{xy} - \lambda_{\min} Z = R_{xy} - \sigma^2 Z = AP\phi S^H$
- ③ 对 C_{xx} 做奇异值分解, 得到 Σ_1, U_1, V_1
- ④ 计算 $U_1^H C_{xy} V_1$
- ⑤ 求矩阵对 $\{\Sigma_1, U_1^H C_{xy} V_1\}$ 的广义特征值 λ_i

$$\text{⑥ 计算矩阵 } \lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_p \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ \lambda_1^{M-1} & \lambda_2^{M-1} & \cdots & \lambda_p^{M-1} \end{bmatrix}, \quad A = (\lambda^H \lambda)^{-1} \lambda^H X$$

- ⑦ 确定各分量幅值 $Ad = 2|A|$

5. 仿真实验

仿真实验利用 Matlab 软件进行, 使用傅里叶变换和总体最小二乘旋转不变子空间两种算法对同一个信号进行处理, 求取特征值, 并进行比较。

定义模拟信号为:

$$x = 20 \sin(200 \times 2\pi t) + 40 \sin(300 \times 2\pi t) + r$$

r 为 -1 与 1 之间的随机数作为噪声信号。采样频率 1 kHz, 时间 1 s, 信号波形如图 1 所示。

分别使用傅立叶变换和 TLS-ESPRIT 算法进行分析, 结果如表 2。

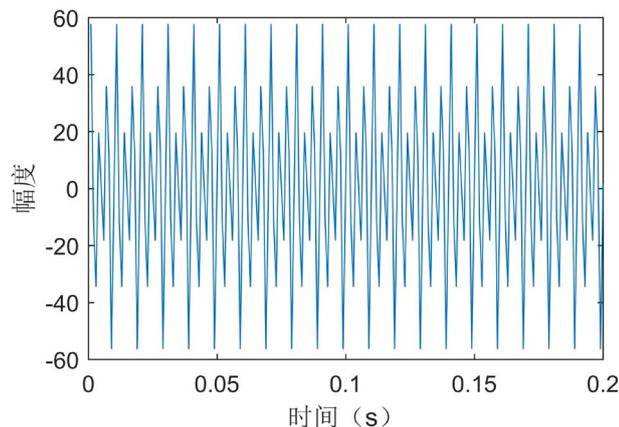


Figure 1. Waveform of signal in mutilation

图 1. 仿真信号波形(0~0.2 s 部分)

Table 2. Compare of FFT and TLS-ESPRIT in simulation

表 2. FFT 与 TLS-ESPRIT 仿真结果比较

特征参数	频率 1 (Hz)	幅度 1	频率 2 (Hz)	幅度 2
真实值	200	20	300	40
FFT	200.0073	19.3354	300.1416	40.0680
TLS-ESPRIT	200.0012	20.0102	300.0100	40.0002

由仿真结果可以看出, 快速傅立叶变换和 TLS-ESPRIT 算法均可较准确地提取含噪声信号的频率和幅度特征, 而 TLS-ESPRIT 算法相对于 FFT 算法的特征提取准确度更高。因此, 利用 TLS-ESPRIT 分析电流高频特征具有可行性。

6. 泄漏电流特性的研究

绝缘子电流高频成分中包含着许多有关绝缘子工作情况的隐藏信息, 一般通过对泄漏电流特性的分析, 能获得绝缘子的工作情况。

利用 TLS-ESPRIT 算法对提取到的泄漏电流的高频特征参数进行对比分析。结果如图 2~图 4 所示。

由图 2 幅频特性可以得出, 无污秽和清洁雾的情况泄漏电流幅值较小, 雾水含有硝酸盐和硫酸盐时, 泄漏电流幅值较大, 且频率分布有明显的差异。

图 3 绘制了无污秽和清洁雾情况下泄漏电流的幅频特性, 可以看出泄漏电流在各频率分布比较分散, 而在 1.4 MHz 频率附近均有集中趋势。在 1 MHz 以下频率段, 绝缘子喷淋清洁雾后的幅值较无污秽时增大, 说明存在雾水之后泄露能量增加。

图 4 绘制了以硝酸盐为主的污雾和以硫酸盐为主的污雾情况下泄漏电流的幅频特性, 两种情况的总体幅度相当, 而频率分布有较大的不同。以硝酸盐为主的情况中, 泄漏电流在 1.4 MHz 频率附近较为集中, 与无污秽和清洁雾的分布情况基本相同, 而幅值比前两种情况大大增强。以硫酸盐为主的情况中, 泄漏电流在 0.1 MHz 至 0.7 MHz 频段能量较为集中, 而在 1.4 MHz 频率附近并未出现较大幅度的增强。

7. 实验结果分析

7.1. 实验结果的统计分析

假设幅频特性由多个正态分布

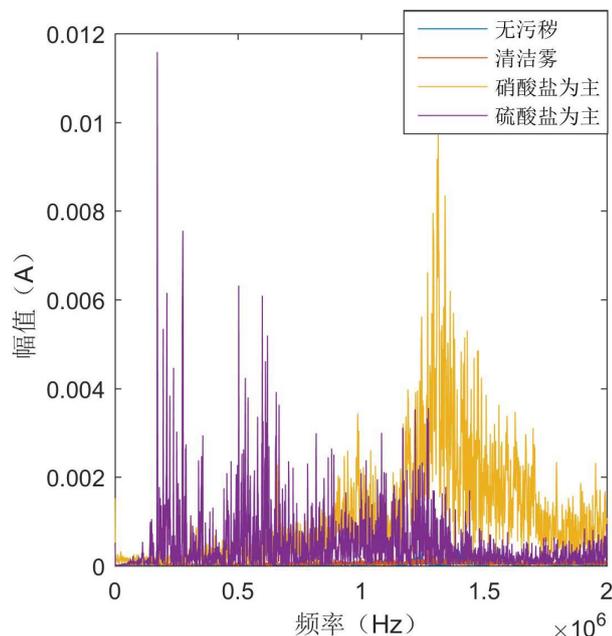


Figure 2. Amplitude frequency characteristics of leakage current
图 2. 泄露电流幅频特性曲线

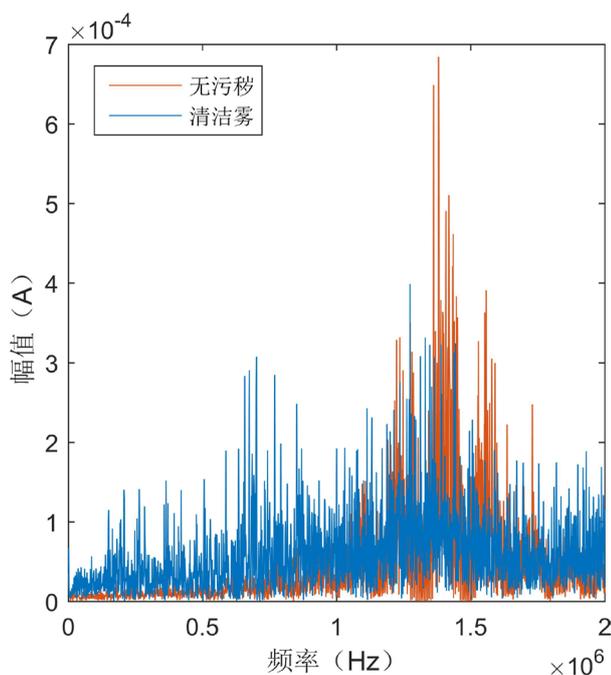


Figure 3. Amplitude frequency characteristics of leakage current in clean and clear-fog conditions
图 3. 无污秽、清洁雾情况下泄露电流幅频特性曲线

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

叠加而成，每一个正态分布由高度 A 、位置 B 、宽度 C 决定，因此使用高斯拟合方法对幅频特性进行拟

合。高斯函数表示为

$$Gi(x) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{(x-B_i)^2}{c_i^2}}$$

经过多次尝试, 对于以硝酸盐为主的情况的幅频特性, n 设置为 4 时拟合精度最高, 对于以硫酸盐为主的情况的幅频特性, n 设置为 6 时拟合精度最高。拟合结果如图 5~图 6。

由拟合曲线可以得出, 以硝酸盐为主的情况的幅频特性分别在 $f_1 = 1.318$ MHz 和 $f_2 = 1.468$ MHz 频率处存在峰值, 以硫酸盐为主的情况的幅频特性在 $f_1 = 0.199$ MHz、 $f_2 = 0.266$ MHz、 $f_3 = 0.498$ MHz、 $f_4 = 0.603$ MHz 频率处存在峰值。由此可见, 以硝酸盐为主的情况出现峰值的频率比以硫酸盐为主的情况出现峰值的频率较高。

7.2. 实验结果的化学分析

将放电过程看做一个电解的过程, 污雾看做电解液, 不同离子在电解液中的迁移速率不同, 即离子淌度不同。离子移动速率表示为

$$r_+ = u_+ \frac{dE}{dl}, r_- = u_- \frac{dE}{dl}$$

其中比例系数 u_+ 和 u_- 相当于单位电梯度中离子迁移速率, 即为离子淌度。通过查阅文献获知, SO_4^{2-} 离子的离子淌度为 $8.27 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, 带两个单位的负电荷, NO_3^- 离子的离子淌度为 $7.40 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, 带一个单位的负电荷[21]。由于电荷量和离子淌度的差异, 导致离子在溶液中往复运动的频率不同, 表现为不同溶液情况下漏电电流频率分布的差异。

8. 结论

本文通过模拟雾霾环境中的绝缘子的运行情况, 采用 TLS-ESPRIT 算法分析, 比较了无污秽绝缘子、

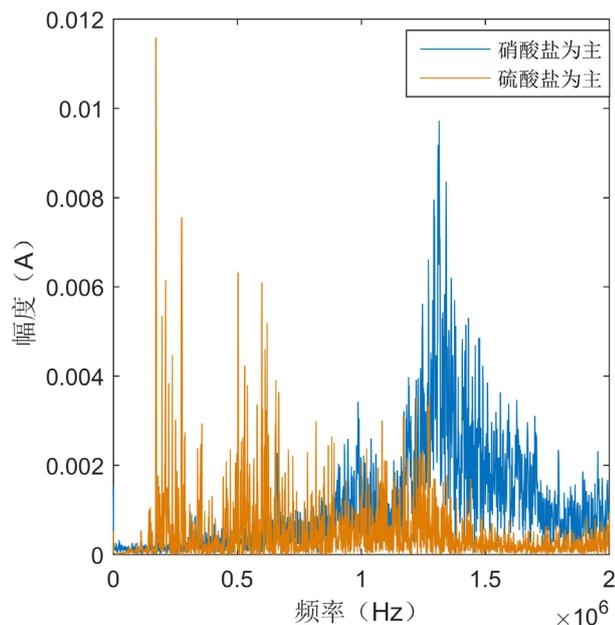


Figure 4. Amplitude frequency characteristics of leakage current in sulfate and nitrate conditions

图 4. 以硝酸盐为主的污雾和以硫酸盐为主的污雾情况下泄露电流幅频特性曲线

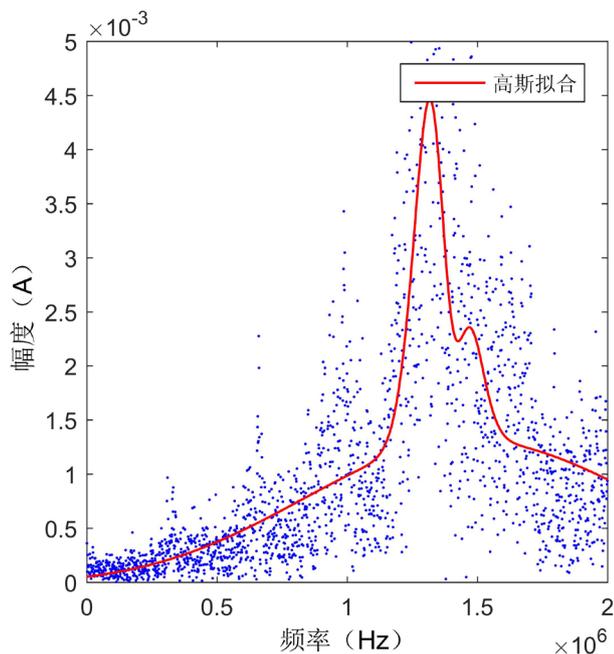


Figure 5. Gaussian fitting of amplitude frequency characteristic in sulfate condition

图 5. 以硝酸盐为主的情况的幅频特性高斯拟合结果

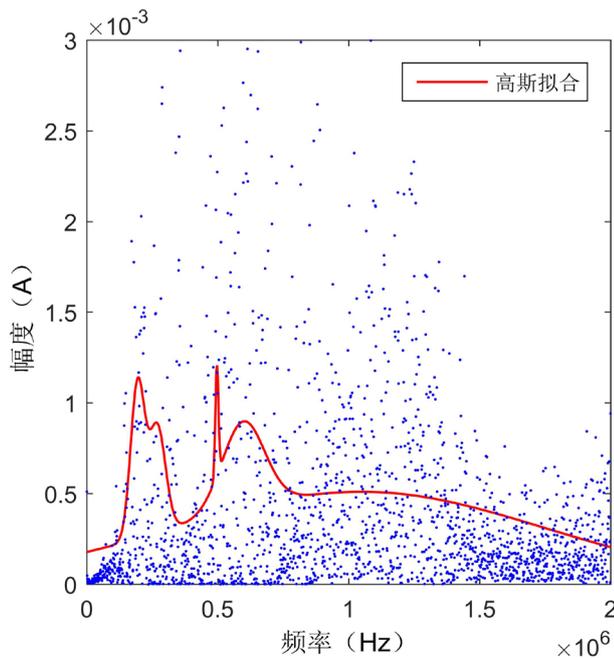


Figure 6. Gaussian fitting of amplitude frequency characteristic in nitrate condition

图 6. 以硫酸盐为主的情况的幅频特性高斯拟合结果

清洁雾喷淋的污秽绝缘子、以硫酸盐为主的污雾喷淋的污秽绝缘子和以硫酸盐为主的污雾喷淋的污秽绝缘子泄漏电流高频段的频率特性。当绝缘子表面被盐溶液污染时，绝缘子表面离子浓度增加，电导率因此增加，泄漏电流的幅值更大，更容易发生闪络。频率特性的高斯拟合结果显示，以硝酸盐为主的情况

的幅频特性分别在 $f_1 = 1.318$ MHz 和 $f_2 = 1.468$ MHz 频率处存在峰值, 以硫酸盐为主的情况的幅频特性在 $f_1 = 0.199$ MHz、 $f_2 = 0.266$ MHz、 $f_3 = 0.498$ MHz、 $f_4 = 0.603$ MHz 频率处存在峰值。由于 SO_4^{2-} 离子和 NO_3^- 离子的离子淌度和电荷量不同, 以硝酸盐为主的情况峰值频率较大, 表示泄漏电流能量更大。

参考文献 (References)

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 吴光亚. 我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J]. 电瓷避雷器, 2010, 19(5): 7-11.
- [3] 文习山, 蓝磊, 蒋日坤. 绝缘子污秽闪络的统计特性及风险评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 1-7.
- [4] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] 蒋坤. 绝缘子故障诊断方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [6] 黄欢. 基于泄漏电流特征量的绝缘子污闪预测的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [7] 李璟延, 司马文霞, 孙才新, 杨庆, 胡建林, 王荆. 绝缘子污秽度预测特征量提取与神经网络模型[J]. 电力系统自动化, 2008(15): 84-88.
- [8] 石岩. 基于泄漏电流特征量的绝缘子污闪预测模型及方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [9] 夏青. 线路绝缘子交流污秽预测的新特征量研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [10] 陈伟根, 夏青, 孙才新, 李立涅. 绝缘子放电区段划分及污秽预测的泄漏电流分形维数研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 121-127.
- [11] 王黎明, 张军广, 赵晨龙, 戴罕奇, 周志成, 高高. 绝缘子饱和受潮条件下泄漏电流预测方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1416-1423.
- [12] 苑吉河. 输电线路绝缘子(串)交流污闪特性及放电过程的研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学.
- [13] 魏嘉, 吕阳, 付柏淋. 我国雾霾成因及防控策略研究[J]. 环境保护科学, 2014(5): 51-56.
- [14] 张开贤, 俞燮根, 宿志一. 湿沉降对输变电设备染污及放电的影响[J]. 中国电力, 1997, 30(11): 3-7.
- [15] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2284-2290.
- [16] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [17] 许允之. 电网过电压数据的数理统计方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(3): 61-65.
- [18] Sun, X.W. (2015) Harmonic Frequency Stimation Algorithm Based on ESPRIT and MSWF in Power System. *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, **9**, 518-523. <https://doi.org/10.2174/1874129001509010038>
- [19] Chakkor, S. (2015) Enhanced ESPRIT Algorithm for Optimal Wind Turbine Fault Recognizing. *International Journal of Computer Science: Theory and Application*, **3**, 29-39.
- [20] 李敏, 盛毅. 高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2352-2355.
- [21] 傅献彩. 物理化学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2005.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：tdet@hanspub.org