

静电除尘器故障诊断系统的研究

王 洋, 王宁会

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁大连 116023)

摘 要: 静电除尘器的稳定运行需要整个系统的各部分关键信息, 尤其是故障信息. 本文采用 PRONY 方法研究了静电除尘器两种容易混淆的故障: 反电晕故障、极间距变小故障. 研究表明, 该方法的分析结果可以很好的辨识两种故障, 克服了传统方法的不足.

关键词: 静电除尘器; 故障诊断; PRONY

中图分类号: TM764; TM6; TP302; X5 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 10-1510-03

Study on Electrostatic Precipitator Fault Detection System

WANG Yang, WANG Ninghui

(Dept. of Electrical Appliances and Applied Electronics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Electrostatic precipitator needs every kinds of important information of whole system, especially system fault information, to run stably. This paper analyzes back corona fault and plate-line distance shorten failure by PRONY method, which are two indistinguishable faults of electrostatic precipitator. The research result shows that PRONY method can distinguish these two faults efficiently, which can redeem the inefficiencies of traditional methods.

Key words: electrostatic precipitator; fault detection; PRONY

1 引言

静电除尘器^[1] (Electrostatic Precipitator, 简称 ESP) 是一种大型的工业除尘设备, 因为具有除尘效率高, 能耗低, 能够处理高温和大烟气量的气体等特点而被广泛地应用在电力行业、水泥行业、钢铁行业, 已经成为各行业烟气治理的主要设备. 近年来, 由于 ESP 故障率的上升, 尤其是反电晕故障和 ESP 极间距变小故障的发生率越来越高, 导致了 ESP 的除尘效率下降, 甚至是工作失效.

高比电阻粉尘是引起 ESP 反电晕故障的主要原因之一. 当 ESP 运行在高比电阻粉尘下时, 极易发生反电晕. 反电晕发生时, 粉尘表面呈现出恰似发生磷光那样的外观; 与此同时, 放电电流猛增, 反电晕非常容易延伸成为闪烁状并向火花放电过渡, 从而产生激烈的火花放电. 反电晕故障的最终结果将导致 ESP 完全失效. 目前判断反电晕故障的方法^[2]还是以发生反电晕故障时 ESP 伏安特性曲线存在的负阻区和拐点为依据的.

ESP 极间距变小故障将导致 ESP 线板有效间距变小, 极板间绝缘水平下降, 造成电场击穿电压偏低, 由局部放电引起火花放电, 极大的影响了 ESP 的除尘效率. 目前检测 ESP 有效极板间距变小故障的主要判断依据是: 二次工作电流正常或偏大, 二次电压低于正常运行电压时就发生火花放电.

如果 ESP 处理的烟气状态正常, 那么这两种故障就相对容易识别. 但是, 如果 ESP 收尘极板上积有高比电阻粉尘并发

生反电晕故障时, 就有可能出现与 ESP 极间距变小故障判断依据表现相似的情况, 即二次电流正常或偏大, 二次电压低于正常运行电压就发生火花放电, 这种现象造成两种故障辨识的困难.

由于导致 ESP 反电晕故障和极间距变小故障的原因不同, 因此运行部门会根据不同的情况采取适用的故障排除方法. 比如 ESP 极间距变小故障一般都归结为机械故障、或机械形变等无法自恢复的故障状态, 一旦发现就应该立即采取停机检修等措施, 否则 ESP 就将始终无法正常运行, 并有可能因为不能得到及时的检修、更换, 会出现突变性的恶劣故障, 运行部门将面临着严重准备不足的危险.

由此可见, 必须研究一种新的辨识手段, 有效地辨识 ESP 反电晕故障和 ESP 极间距变小故障.

2 实验设计

ESP 实验系统采用单根 RS 型芒刺线, 芒刺线长度约为 0.6m; 收尘极板采用平板型电极形式, 平板面积为 2m² (长度 2m, 高度 1m), 线板间距可调. ESP 实验系统采用负高压直流电源 (0~ - 100kV 可调, 最大功率 10kW) 供电. ESP 实验系统的两块极板通过导线并联接入大地. 高压电源的高压输出经过限流电阻与 RS 型芒刺线串联, 同时高压电源的机壳接入大地. 整个 ESP 实验系统的一点接地, 并且图 1 中高压探头的接地点在实验中与 ESP 系统一点接地, 防止发生放电时不同接地点的地电位产生电位差.

测量设备:美国惠普 HP INFINIUM 54810A 数字存储示波器,带宽 500MHz, 采样率 1GSa/s, 存储深度 4M 字节;日本脉冲电子公司 EP- 100K 脉冲高压分压器,分压比为 5000B1, 阻抗为 2000M Ω , 电容为 6pf;美国泰克公司的 Tektronix GL24 型电流探头, AM502A 增幅器, 带宽为 0.5Hz- 20MHz; 高压直流电流表, 0- 20mA.

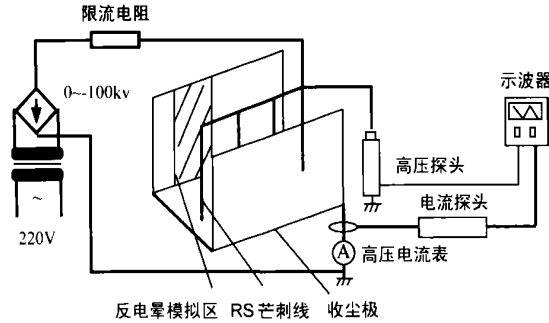


图 1 ESP 实验系统原理图

ESP 反电晕模拟实验采用高比电阻纸介质模拟高比电阻粉尘。文献[3]采用高比电阻纸介质进行反电晕的研究, 模拟效果良好。在室温 20 $^{\circ}$ C、相对湿度 60% 的条件下, 测得本实验所采用纸介质的比电阻约为 $2.67 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, 属于高比电阻范围。实验通过在清洁极板上逐渐增加纸介质的厚度模拟 ESP 高比电阻粉尘层厚度的增加, 模拟 ESP 由正常的工作状态向反电晕故障发展的变化过程。

ESP 极间距变小故障实验采取改变 RS 芒刺线的个别芒刺形状, 使其与收尘极板间距变小的方法模拟 ESP 极间距变小故障的发生。两种实验选择 65mm 线板间距, 调整 RS 芒刺线的个别芒刺与收尘极板的间距, 使其的火花放电电压与反电晕模拟实验在该间距下的火花放电电压相同, 以此时火花放电产生的二次电压瞬态信号为 PRONY 分析的对象, 进行 PRONY^[4]方法分析, 研究新的辨识两种故障的手段。

3 PRONY 算法分析

PRONY 算法是采用等间隔复指数的线性组合来拟合观测数据。PRONY 算法是分析信号中的模态、阻尼、相位和幅值等信息的一种技术。该算法在电力系统的响应信号分析中已获得初步的研究成果并显示出其良好的应用前景^[5]。

设观测数据为 $x(n)$ ($n=0, \dots, N-1$)。PRONY 算法采用复指数线性组合的估值器模型来拟合数据, 即在 n 时刻对观测值的估值设为

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^P b_m y_m^n, n=0, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中 $b_m = A_m \exp(jH_m)$ (2)

$$y_m = \exp(A_m + jX_m) \quad (3)$$

式中 A_m 为幅度; H_m 为相角(以弧度为单位); A_m 为指数阻尼因子; $X_m = 2\pi f_m$, f_m 为归一化的频率。构造目标函数

$$J = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

使之最小化。这样原则上可以求得参数的最小二乘估计。

PRONY 算法的特点在于避开直接求最小二乘解, 注意到式

(1)、(2)形式的指数函数是某一齐次线性差分方程的解。该差分方程形式为

$$\hat{x}(n) - \sum_{k=1}^P a_k \hat{x}(n-k) = 0 \quad (5)$$

只要找到这个方程, 估值器式(1)中的诸参数就可以通过式(5)中的系数 a_k 求出。设估计误差

$$h(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (6)$$

$$x(n) = \sum_{k=1}^P a_k \hat{x}(n-k) + u(n) \quad (7)$$

式中 $u(n) = \sum_{k=1}^P a_k h(n-k)$, $n=0, \dots, N-1$ (8)

这样序列 $x(n)$ 可以看作是噪声 $u(n)$ 激励某 AR 模型的输出, 该 AR 模型的参数 a_k ($k=1, \dots, P$), 正是待求的差分方程的系数。而噪声 $u(n)$ 则是估计误差 $h(n)$ 通过某 MA 模型的输出。求出诸参数 a_k ($k=1, \dots, P$) 后, 指数因子 y_m , $m=1, \dots, P$, 可由多项式求根而出:

$$\sum_{k=0}^P a_k y_m^{P-k} = 0 \quad (9)$$

根据式(1), 令 $\hat{x}(0) = x(0)$, 有

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_p \\ s & s & \dots & s \\ y_1^{N-1} & y_2^{N-1} & \dots & y_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ s \\ b_p \end{bmatrix} = \hat{x} \quad (10)$$

其中 $\hat{x} = [\hat{x}(0), \dots, \hat{x}(N-1)]^T$ 。参数 b 可以通过式(10)的最小二乘解求出, 其解为

$$b = (S^H S)^{-1} S^H \hat{x} \quad (11)$$

$$S^H S = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1p} \\ s & s \\ r_{p1} & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$r_{ij} = \sum_{n=0}^{N-1} y_i^n y_j^{*n} = \frac{1 - (y_i y_j^*)^N}{1 - y_i y_j^*} \quad (13)$$

至此, PRONY 模型式(1)各参数都已求出:

$$\left. \begin{aligned} A_m &= |b_m| \\ H_m &= \arctan[\text{Im}(b_m) / \text{Re}(b_m)] \\ f_m &= \arctan[\text{Im}(b_m) / \text{Re}(b_m)] / 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

4 实验结果分析

ESP 实验系统进行了两种故障的 6 种程度对比实验, 为了节省篇幅, 本文只将其中的两种故障的对比波形(为了方便分析, 原始瞬态信号首先进行归一化处理)进行图示, 如图 2 和图 3。采用 PRONY 方法分析 ESP 系统在同样的火花放电电压下所模拟的 ESP 极间距变小故障的二次电压瞬态信号和 ESP 线板间距下 65mm 时所模拟的 6 种程度的反电晕实验下的二次电压瞬态信号进行对比, 将 PRONY 的处理结果和整个实验过程的相关数据, 形成表 1。

如表 1, 65mm 线板间距清洁极板下的火花放电电压为 56kV, 电流为 6.9mA。测量模拟 ESP 极间距变小故障实验的数据发现: 尽管实验过程中, ESP 火花放电电压逐渐降低, 但是几种情况下的伏安特性曲线与 65mm 下 ESP 清洁极板的伏安特性曲线基本上完全重合。这是因为 RS 芒刺线上的一个

表 1 两种 ESP 故障 PRONY 处理结果对比

火花放电二次电压 (kV)	ESP 极间距变小故障			ESP 反电晕故障		
	故障点极间距 (mm)	二次电流 (mA)	阻尼因子	介质厚度 (mm)	二次电流 (mA)	阻尼因子
- 56	65	6190	- 21 26e+ 005	010	6190	- 21 26e+ 005
- 38	50	2140	- 21 20e+ 005	012	2174	- 21 40e+ 005
- 34	46	1180	- 11 90e+ 005	014	2163	- 31 01e+ 005
- 30	42	1130	- 11 80e+ 005	018	2175	- 31 25e+ 005
- 25	37	0174	- 11 75e+ 005	112	0161	- 31 76e+ 005
- 22	35	0151	- 11 65e+ 005	116	0130	- 41 05e+ 005
- 20	33	0137	- 11 60e+ 005	210	0125	- 41 50e+ 005

针与清洁极板间距的改变对整个电晕电流的影响非常小。如表 1, ESP 实验模拟极间距变小故障的故障点的针板间距为 50mm 时, 火花放电电压为 -38kV, 放电点的电晕电流为 2.4mA; 而反电晕模拟实验在相同火花放电电压下的电晕电流约为 2.74mA。根据目前使用的判据: 二次工作电流正常或偏大, 二次电压低于正常运行电压时就发生火花放电。那么, 无论是反电晕模拟实验下的火花放电还是模拟 ESP 线板间距变小故障的火花放电, 都符合这个判据; 并且两者的放电点电流数值差异很小, 本身就无法进行二者的辨识。

误判断为 ESP 线板间距变小故障。对于其他的放电点, 两种火花放电的电流区别很小, 根本无法有效的辨识这两种故障。

采用 PRONY 方法的分析结果进行两种故障的辨识如图 4. 2, 可以看到 ESP 反电晕故障二次电压瞬态信号的阻尼因子随着火花放电电压的降低而逐渐减小, 相反 ESP 极间距故障的二次电压瞬态信号的阻尼因子却随着火花放电电压的降低而逐渐增加, 两者的发展趋势完全不同, 这说明了 PRONY 方法可以很好地辨识这两种故障。

5 结论

本文提出了一种有效的辨识 ESP 反电晕故障和 ESP 极间距变小故障的方法, 采用该方法能够弥补传统的诊断 ESP 反电晕故障和 ESP 极间距变小故障的判断依据的不足。实践证明 PRONY 方法对于 ESP 火花放电时产生的瞬态信号分析, 可以反映出 ESP 的部分工作状态, 包括一些重要的故障信息。这为研究 ESP 反电晕故障和 ESP 极间距变小故障的预诊和诊断提供了一个有效的解决方法。

参考文献:

- [1] Mizuno A. Electrostatic precipitation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 615- 624.
- [2] Snyder TR, Bush PV, Pontius DH. Laboratory analysis of backcorona discharge [J]. Journal of Electrostatics, 1987, 19(1): 101- 1141.
- [3] 许德玄, 孙大伟. V 型极板抑制高比电阻粉尘反电晕的研究 [J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 22- 25.
- [4] 王洋, 王宁会. 基于 Prony 算法静电除尘器放电信号的分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 141- 144.
- [5] Tawfic MM, Morcos MM. Prony application for locating faults on loop systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(8): 41- 43.

作者简介:

王 洋 男, 1957 年生于大连, 1998 年 9 月至 2003 年 7 月就读于大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 攻读博士学位, 主要的研究方向为系统故障诊断研究以及实时监控系统的软件开发。email: cume@sohu.com



王宁会 男, 1954 年生于长春, 大连理工大学电气工程与应用电子技术系教授, 主要致力于功率控制技术方面的研究。

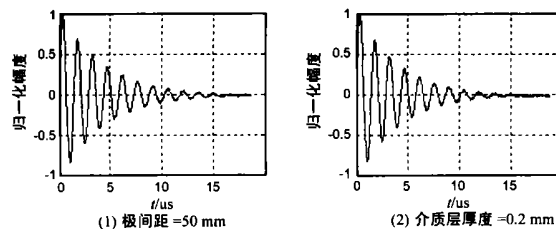


图 2 38kV 放电电压下的瞬态信号对比图

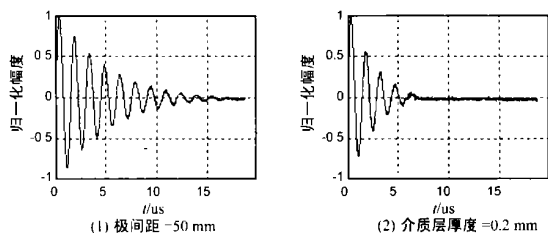


图 3 22kV 放电电压下的瞬态信号对比图

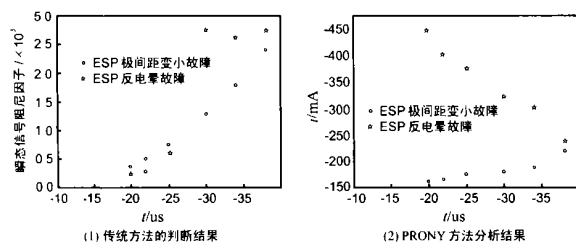


图 4 分析结果对比图

图 4. 1 说明了采用传统方法时整个实验过程的区分程度的变化; 如图所示, 火花放电电压为 30kV 和 34kV 时, 两种放电的电流区分最大。但是, 反电晕实验的电流要比针板间距变小故障实验的电流大, 这也就是说, 仅仅根据判别 ESP 极间距变小故障的判据条件: 二次工作电流正常或偏大, 二次电压低于正常运行电压时就发生火花放电, 仍然可能将反电晕故障