

# 开关柜内部弧光短路伴生弧声的频谱特性研究

蓝会立<sup>1</sup>, 张认成<sup>2</sup>

(1. 广西工学院电子信息与控制工程系, 广西 柳州 545006; 2. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为了避免或减少故障电弧的危害, 笔者建立了故障电弧探测试验系统, 采用功率谱分析的方法对故障电弧的早期弧声特性进行了试验研究, 提取出故障电弧的早期弧声特征信息。研究表明: 故障电弧发生之前, 电弧声的频率主要分布在 5~10kHz 的特征频段内, 其带宽、频率中心和能量强度与电极形状、放电距离、放电电压等试验条件有关。通过监测该特征频段内微弱弧声是否存在, 即可实现开关柜故障电弧的早期探测预警。

关键词: 开关柜; 故障电弧; 弧声特征; 预测预警

中图分类号: TM591

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0107-03

## Study on Arc Sound Signature of Fault Arc in Switchgear

LAN Hui-li<sup>1</sup>, ZHANG Ren-cheng<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Information & Control Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China;  
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to avoid or reduce arc fault hazard, the authors established an arc fault detecting test system with the method of power spectral analysis to study the early acoustic characteristics of fault arc, and extracted the sound signature of early fault arc by using power spectrum analysis. The results show that the signature band of sound wave is within the range from 5kHz to 10kHz before fault arc taking place, and variable in both width and center with different electrode shapes, space between electrodes, and discharge voltage. By monitoring the existence of weak arc in this band, early detection and warning of switchgear arc fault can be realized.

Key words: switchgear; fault arc; arc sound signature; forecast and early warning

## 0 引言

开关柜内部电弧光短路是一种频发性、灾难性故障, 越来越严重地威胁着电力设备的安全运行。开关柜内部的电弧短路故障, 往往由于没有得到及时清除, 发展成为中低压母线故障, 造成供电系统失稳、大面积停电、开关设备严重烧毁等灾难性后果, 甚至造成人身伤亡事故, 给国家和人民造成重大的经济和生命财产损失。为避免或减少故障电弧的危害, ICE 298 规定故障电弧的切除时间必须小于 100ms。国际上从 20 世纪 90 年代初开始对电弧故障的物理特性、产生机理及探测方法进行深入细致的研究<sup>[1-5]</sup>。目前国内使用以过流检测为基础的中低压母线保护方案, 其切除时间都在 300ms~1.4s<sup>[6]</sup>, 无法达到快速保护母线的目的。国外成熟的弧光-过流双判据故障电弧保护系统, 切除时间小于 100ms, 采取的策略是一种事后被动的保护机制。

故障电弧保护的基本思想是实时检测故障电弧的弧光或(和)电流信号, 当信号幅值超过预定的阈值时启动控制系统, 使断路器动作。故障电弧切除时间取决于电弧检测时间和断路器的动作时间, 就目前技术发展水平而言, 故障电流检测时间已降得很短, 相对较长的断路器动作时间已成为制约切除时间的技术瓶颈, 导致大多数电弧保护系统不能满足快速切除的要求。弧声是故障电弧放电过程伴生的一种物理现象, 而且在故障电弧产生前就已经出现, 它们之间必然存在着密切的内在联系, 揭示这种关系就有可能通过监测弧声信号实现故障电弧的早期探测, 改变传统的故障电弧被动保护模式, 最大程度地避免或减少故障电弧的发生。

故障电弧及其弧声的产生机理相当复杂, 目前还没有成熟的理论和可靠的试验数据可以直接应用于开关柜故障电弧的防治领域。然而, 弧声检测在 GMAW 焊接、变压器故障诊断等方面已取得较好的研究成果<sup>[7-12]</sup>。因此, 笔者研究故障电弧早期弧声信号

收稿日期: 2007-10-23; 修回日期: 2008-01-15

基金项目: 福建省高新技术研究开发计划重点项目(2005H036)。

作者简介: 蓝会立(1975-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事传感器与检测技术、信号分析与处理等方面的研究与教学工作。

的频谱特征,探讨弧声与故障电弧之间的内在关系,为实现故障电弧的早期探测奠定理论和试验基础。

### 1 故障电弧探测实验系统与方案

为研究故障电弧早期弧声的特征,建立了如图1所示的故障电弧探测试验平台。其中,放电装置由QF-05-250型电弧发生器、XCJH3-5kVA控制器以及TDM-5kVA油浸式交、直流两用变压器组成。试验平台的输出放电电压可达50kV。电弧发生器的放电电极采用尖形、棒形以及球形3种形式,放电距离等可根据需要予以调节。利用电流传感器和光电传感器检测电弧放电过程的弧光和电流信号,系统选用的光纤声音传感器可以保证在强电磁干扰下可靠地提取弧声信号。利用基于Labview的数据采集系统对试验过程伴生的电弧声进行采集,然后对试验数据进行离线处理。

通常情况下,电弧放电过程与电极形状、间隙长度、放电电压和周围大气等复杂因素有关。为了研究早期弧声在不同试验条件下的内在特征,依照电极形式和放电距离的不同,设计6组试验,每组根据放

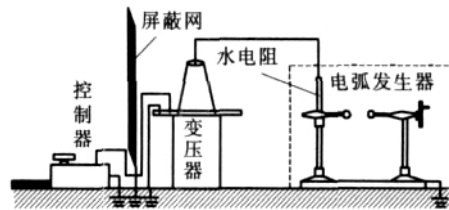


图1 故障电弧试验系统

电电压范围又分为5个试验,实验方案见表1。试验时,调节放电距离后,启动控制器,使放电电压由0kV缓慢上升,直至电弧放电,并在规定电压范围内采集弧声信号。实验结果见图2~4。

表1 实验方案

电极形式	序号	放电距离/mm	放电电压/10kV				
棒形-棒形	1	65	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电
	6	75	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电
球形-球形	11	20	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电
	16	30	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电
尖形-尖形	21	85	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电
	26	95	0	0-2	2-3	3-4	4-电弧放电

注: '0-2'表示电压从0均匀变化到20kV的过程,其它的同理。

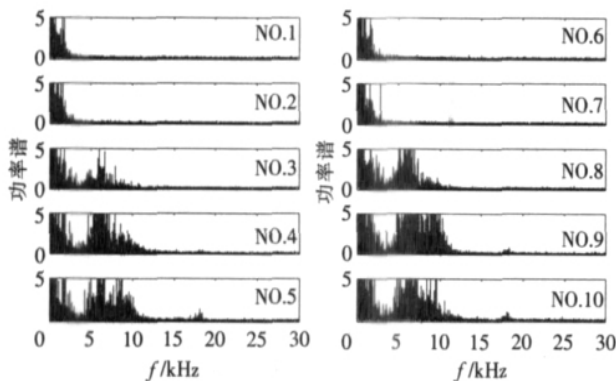


图2 棒形电极在不同工况下的弧声功率谱

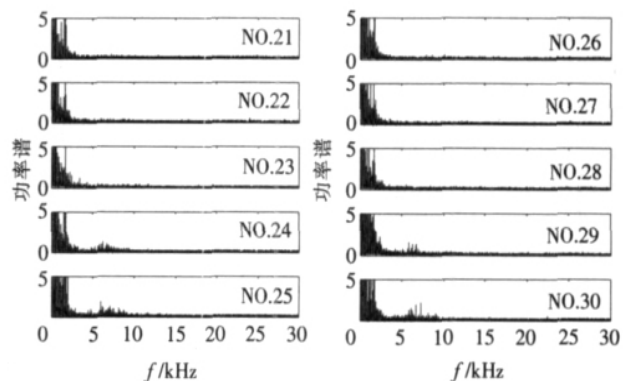


图3 球形电极在不同工况下的弧声功率谱

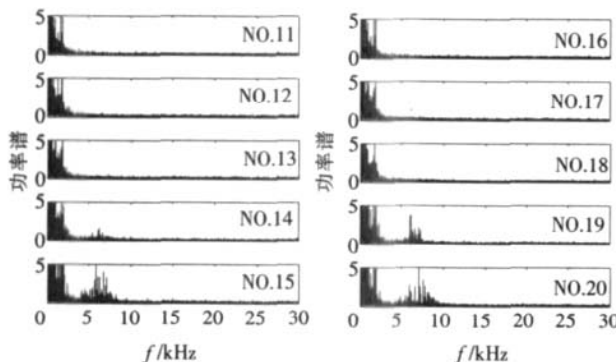


图4 尖形电极在不同工况下的弧声功率谱

### 2 故障电弧早期弧声频谱特征分析

图2是棒形电极在放电间隙分别为65mm和75mm下不同放电过程的故障电弧弧声功率谱曲线图。图NO.1是未加放电电压时得到的背景声谱,即环境噪声。由图可知,试验数据中带有很强的背景噪

声,尤其是在2kHz以下的低频段;2kHz以上的高频段的噪声很弱,经分析,低频噪声主要由实验室附近道路上车辆行驶引起的噪声所致。当电极间开始加上放电电压后,如图中的NO.2,声功率谱与背景噪声谱基本相同,说明此时还没有产生电弧声;随着两极电压的不断增高,以至电弧放电,如图中的NO.3~5,声功率谱有显著的变化:在5~10kHz的频段产生一个明显的峰值,峰值中心随放电过程而稍有移动。由于在背景声谱和放电电压比较低的条件下的声功率谱不包含这一波峰,而且这个波峰是在高压放电实验过程中产生的,因此推断该波峰为高压放电过程伴生的'滋滋'电弧声信号频率引起的。

为考察电弧声频率在不同电极形式下放电是否保持稳定,做出了球形(11~20号试验)、尖形(21~30号试验)电极在不同工况下的弧声功率谱图,分别见图3、4。由两图中可见,放电电压在30kV之前没有电弧声出现,声功率谱与背景谱基本相同。当放

电电压高于 30 kV 至电弧放电时, 在 5 ~ 10 kHz 频段产生一个明显的峰值, 峰值中心、带宽大小随试验条件的不同而稍有变化。

综上所述, 对于不同的电极形式和放电距离, 弧声功率谱除了在 5 ~ 10 kHz 的频段以外, 其它频段上与背景噪声功率谱没有显著区别, 也就是说故障电弧早期弧声的频率处在 5 ~ 10 kHz 频段内。该特征频段的峰值中心、强度大小和频带宽度随试验条件的不同而稍有变化。其中尖形电极带宽最窄、能量强度最小, 棒形电极带宽最宽、能量强度最大。

### 3 早期弧声的信噪比分析

为了考查弧声信号与外界随机噪声信号的强度大小, 给出了棒形电极的故障电弧弧声功率谱曲线。图 5 是棒形电极在间距 75 mm 下的故障电弧弧声功率谱曲线, 其中图 5(b) 为背景声谱, 图 5(a) 为放电电压在 30 ~ 40 kV 过程的功率谱图。由图 5(b) 可知, 背景噪声谱值都很大, 尤其在 100 Hz 以下的低频段, 干扰信号谱值在  $10^4$  数量级以上。而对于图 5(a), 在 5 ~ 10 kHz 的弧声频段里, 弧声信号谱值仅在  $10^1$  数量级内, 信噪比可达 80 dB。因此, 故障电弧早期弧声信号是非常微弱的, 被淹没在强大背景噪声中。

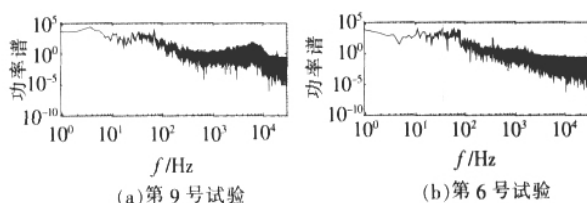


图 5 棒形电极弧声功率谱图

根据以上实验结果, 弧声可以作为故障电弧早期探测的一个状态参量, 利用弧声这个特征频带可以进行故障电弧的早期探测预警, 把传统的故障电弧被动检测方法升级为主动的防护机制, 有利于将故障电弧消除在事故发生之前。

### 4 结语

笔者建立了故障电弧探测试验平台, 采用功率谱分析的方法对故障电弧发生早期的弧声频谱进行

了深入的试验研究, 得到了故障电弧发生早期乃至电弧放电过程电弧声的频率主要集中在可听波 5 ~ 10 kHz 的波段, 其带宽、中心频率和能量大小与电极形式、放电距离、放电电压有密切关系, 而且弧声信号非常微弱。通过在线监测该特征频带的微弱弧声是否存在就可以实现开关柜故障电弧的早期探测预警。

### 参考文献:

- [1] SIDHU T S, GURDEEP SINGH, SACHDEV M S. Arcing Fault Detection Using Artificial Neural Networks [J]. Neurocomputing, 1998, 27(7): 225-241.
- [2] SIDHU T S. Protection of Power System Apparatus Against Arcing faults [C]// 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, 1998: 436-439.
- [3] SIDHU T S, SACHDEV M S, SAGOO G S. Detection and Location of Low-level Arcing Faults in Metal-clad Electrical Apparatus [C]// Developments in Power System Protection, 2001: 157-160.
- [4] SIDHU T S, SAGOO G S, SACHDEV M S. Multi-sensor Secondary Device for Detection of Low-level Arcing Faults in Metal-clad MCC Switchgear Panel [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 129-134.
- [5] LAND H B, EDDINS C L, GAUTHIER L R, et al. Design of a Sensor to Predict Arcing Faults in Nuclear Switchgear [J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 2003, 50(4): 1161-1165.
- [6] 蔡彬, 陈德桂, 吴锐, 等. 开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 83-87.
- [7] MANZ A F. Welding Arc Sounds [J]. Welding Journal, 1981, 60(5): 23-27.
- [8] SAINI D, FLOYD S. An investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-line Quality Control [J]. Welding Journal, 1998, 77(4): 172-179.
- [9] CUDINA M, PREZELJ J. Evaluation of the Sound Signal Based on the Welding Current in the Gas Metal Arc Metal Welding Process [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 2003, 217(5): 483-494.
- [10] 顾文业, 王志敏, 顾晓安. 应用超声波测量法判断变压器内部局部放电的研究 [J]. 噪声与振动控制, 2003(2): 46-48.
- [11] 马跃洲, 金虎, 梁卫东, 等. 短路过渡的 GMAW 电弧声信号特征及产生机理 [J]. 甘肃工业大学学报, 2003(1): 11-14.
- [12] 马跃洲, 马春伟. 基于电弧声波特征的 CO<sub>2</sub> 焊接飞溅预测 [J]. 焊接学报, 2002(3): 19-22.

(上接第 106 页)

- [4] HYTTINEN M, LAMELL J O, NESTLI T F. New Application of Voltage Source Converter (VSC) HVDC to be Installed on the Gas Platform Troll A [C]// CIGRE Session, 2004: B4-210.
- [5] JACOBSON B, JIANG-HAFNER Y, REY P, et al. HVDC with Voltage Source Converters and Extruded Cables for up to 800 kV and 1000 MW [C]// CIGRE Session, 2006: B4-105.

- [6] STEFFEN BERNET, RALPH TEICHMANN, ADRIAN ZUCKERBERGER, et al. Comparison of High-power IGBT's and Hard-driven GTO's for High-power Inverters [J]. IEEE Trans. Industry Application, 1999, 35(2): 487-495.
- [7] EDUARDO P WIECHMANN, ROLANDO P BURGOS, JOACHIM HOLTZ. Current-source Drives Using Sequential Sampling Synchronous Space-vector Modulation [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1275-1289.