输电线路放电声发射现象的试验

王成江[1]，戴 迪[1]，杨 溢[2]
(1. 三峡大学电气信息学院，湖北省宜昌市 443002；2. 万州供电局，重庆市 404000)

摘要：试验研究了输电线路放电电脉冲、放电伴随声发射波及二者间的关系，在大量试验的基础上，总结了绝缘子的内部放电、绝缘子表面污秽放电、线路的尖端电晕、接触不良放电以及近区的雷电等不同形式放电伴随声发射波的特征。结果发现，利用放电电信号和声信号之间的相位差，可以实现输电线路放电源的声发射定位，利用不同形式放电声发射波的外形、周期性和对称性的差别，可以有效地识别放电的形式并进行故障诊断。

关键词：输电线路；放电；声发射；定位；识别

中图分类号：TM835.4

0 引言

高压输电线路上的绝缘故障对电力系统的安全有着很大的威胁[1]。为及时去除绝缘隐患，人们一直在寻找在线监测输电线路故障的有效方法。国内已经出现了很多高压绝缘子在线监测方法[2-8]，并取得了一定的成效，但不少方法存在着测量工作量大、危险性高、设备造价高、测量不准确、抗干扰能力差等问题。因此，寻找一种经济、切实有效的包括绝缘子在内的高压输电线路在线监测方法一直是国内外电力工作人员十分关注的问题。

声发射技术是一种动态检测方法，声发射探测到的能量来自被测试物体本身，而不是像超声或射线探伤那样由无损检测仪器提供。这种方法可提供活性缺陷随载荷、时间和温度等变化的实时或连续信息，因而适用于工业过程在线监控及早期或临近破坏预报[9]。

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射。大多数材料变形和断裂时都会有声发射现象。根据气体放电理论，实际上，放电总伴随着声发射现象[9-10]。因此，根据运行中的绝缘子是否有声发射现象，可判断绝缘子是否发生故障。

本文试验研究放电与其伴随声发射波之间的关系，在大量试验的基础上，总结不同形式放电伴随声发射波的特征，为基于声发射原理的输电线路放电识别和故障诊断打下基础。

1 放电声发射试验

为了研究放电时声发射波的基本特性和传播规律，在实验室做了一系列放电声发射试验。使用的试验装置[11-12]主要有试验变压器、调压器、绝缘子、声发射检测系统等。

试验变压器是一台三相额定容量100 kVA的DJ-100/50变压器，参数为初级线圈380 V，263 A，次级线圈50 kV，2 A，阻抗电压5.23%。在污秽试验中，试品闪络之前会有较大的泄漏电流，此泄漏电流会在电源内阻上产生很大的压降，从而使作用在试品两端的电压降低，阻碍局部电弧的发展，因此试验变压器必须有较低的阻抗，才能提供大的电流。

定制的窄带声发射传感器[13]具有较高的灵敏度和很小的尺寸，将传感器输出的模拟信号转换为数字信号并送入示波器进行观察，其中前置放大和带通滤波模块是在前期研究成果的基础上自制的电路。为更好地研究放电声发射波的特性，采用了美国泰克公司的TDS3032B型数字存储示波器，对放电声发射信号进行仔细观察，其采样率达到了300 MHz。

2 放电与声发射之间的关系

图1示出了实测的绝缘子内部放电典型的电信号、声信号及二者之间的关系。

2.1 放电的电信号

图1(a)示出的是2个工频周期下放电的电信号。从图中可见，绝缘子内部放电具有规则的周期性，对应每个工频周期的正半周期放电1次，放电主要发生在工频电压过正峰值后的下降区域内。放电电信号由一系列间断的电脉冲群组成，脉冲的峰值大致相等，脉冲间的间隔也大致相同，脉冲信号的持续时间在纳秒级范围内。图1(b)是单脉冲电信号时域放大后(10 ns)的波形。

收稿日期：2006-09-11；修回日期：2007-04-25。
湖北省教育厅自然科学研究项目计划资助(D200613004)。

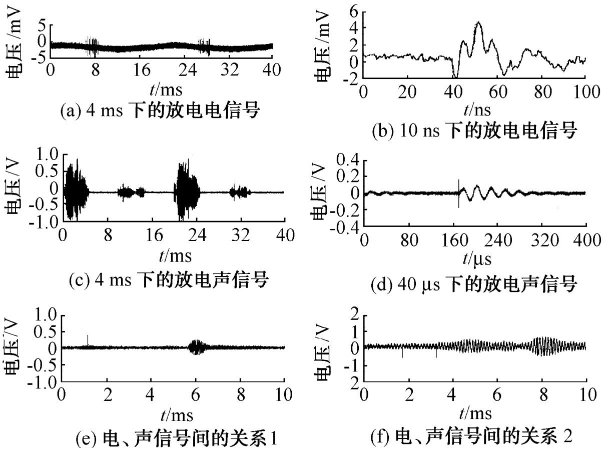


图 1　放电及其声发射波

Fig. 1　Electricity impulse and its acoustic emission wave of discharge

2.2　放电的声信号

图 1(c)是另一组试验中的 2 只传感器测到的绝缘子放电的声发射信号。与电信号相对应,绝缘子放电的声信号也呈现规则的周期性,对应每个工频周期出现 2 次(此时每个工频周期出现 2 次电信号),一次幅度较强,另一次幅度较弱。声发射信号是由多个声发射事件组成的事件群,单个声发射事件是由多次振铃事件组成,因为单个声发射事件持续的时间较长,声发射事件的波形之间相互叠加,导致声发射事件群整体上看起来参差不齐。图 1(d)示出了单次振铃事件在时域 40 μs 下的波形,从图中可见,绝缘子单次放电声发射波(单个声发射事件)的宽度是微秒级的。

2.3　电信号与声信号间的关系

图 1(e),(f)是绝缘子放电时电脉冲信号与声信号之间的对应关系,图 1(e)中的单次尖脉冲就是放电时的电信号,图 1(f)为 2 次放电时的尖脉冲电信号与对应的蛋状声信号。从图中可见,对应的电信号与声信号到达检测设备的时间不一致,二者之间存在着相位差,这是由于其传播速度不同造成的,电脉冲信号到达检测电路的时间可以近似为 0,而声发射信号到达传感器的速度是大约 340 m/s(空气中),从图 1(e)可以算出,放电源离传感器的距离为 60 cm左右,这与试验的实际情况完全一致。

多次试验发现,绝缘子放电电脉冲的幅值、出现的时刻与放电量的大小、放电时刻一一对应,因此,可以利用伴随声发射波作为放电检测的判据之一来判断放电的发生,进一步判断绝缘的劣化和老化。根据电、声信号到达的时间差,可以计算出放电源到传感器之间的距离,实现放电定位。

3　输电线路放电声发射波的试验统计特征

3.1　绝缘子内部放电声发射波

架空线路上的绝缘子长期处于高压场强、机械荷载和气象环境作用下,由于内部应力发生变化,随时间的推移,绝缘子将会不断地劣化,出现内部裂隙、表面破损等,使其电气性能和机械承载能力不断下降,逐渐失去绝缘性能和机械承载能力,绝缘电阻从原来的 10^{12} Ω～10^{14} Ω 下降到300 MΩ以下,从而使不良绝缘子不断产生,以致击穿或破坏。

典型的内部放电声发射波如图 2(a)～(d)所示,图中分别示出了低值绝缘子 6 kV,9 kV 时的内部放电声发射波。图 2(a),(c)为一组(图 2(b),(d)为一组),分别对应通道 1 和通道 2 测得的波形,其中,通道 1 和通道 2 的传感器、前置放大和滤波组件的特性完全一致,但离绝缘子的距离不同。

绝缘子内部放电声发射波具有以下特征:

1)每工频周期(20 ms)监测到声发射信号 2 次,对应工频正半周期和负半周期各 1 次,正、负半周期内的信号分别对称,一般情况下,每个工频周期内,放电声发射信号也是对称的,偶尔也会出现不对称的情况,此时,在工频电压过最大值后的下降区间内,声发射信号的强度较大,而在工频电压过最小值后的电压上升区间内,声发射信号的强度较小。

2)一般在外加电压不太高时,就可以监测到绝缘子内部放电声发射波,也就是说,绝缘子出现内部放电时的起始电压一般在绝缘子正常工作电压以下,此时声发射信号的幅值较小,持续的时间也较短。随外加电压的升高,监测到的放电声发射信号的幅值增加,信号持续的时间变长,开始出现多峰值,继续增加电压,监测到的信号增多以致连成一片,但仍然可以分辨出独立的声发射事件。

内部放电声发射波的外形呈箭头状或蛋状[14]。

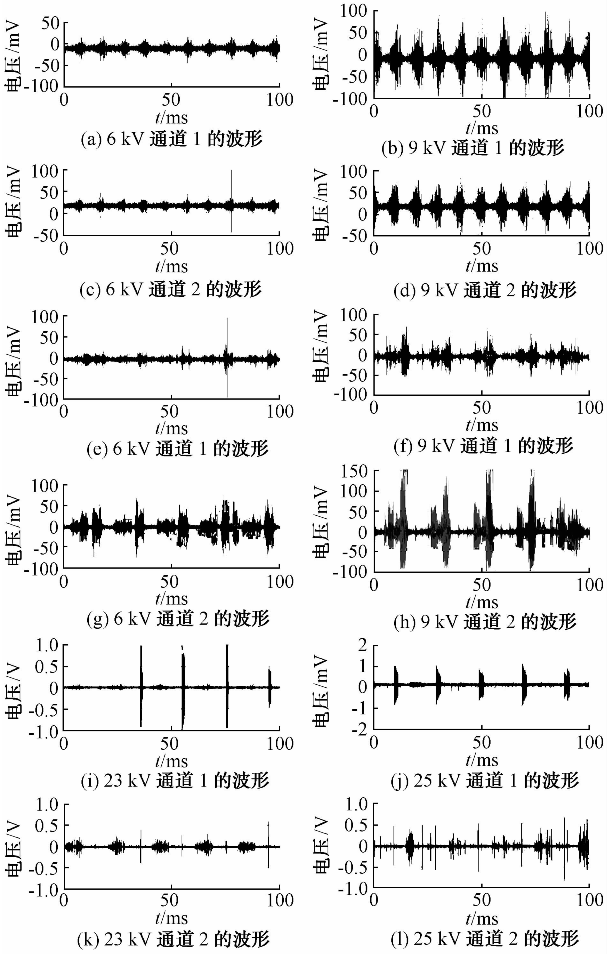
3.2　绝缘子污秽放电声发射波

图 2(e)～(h)分别示出了绝缘子在 6 kV,9 kV 时的污秽放电声发射波。图 2(e),(g)为一组(图 2(f),(h)为一组),分别对应通道 1(传感器靠近绝缘子悬空)和通道 2(传感器紧贴绝缘子表面)测得的波形。

绝缘子污秽放电声发射波具有以下特征:

1)绝缘子污秽放电声发射事件具有周期性,对应于工频正半周期,在相对稳定的位置有 1 次声发射事件,声发射波的强度大、次数少、放电位置集中;对应于工频负半周期,声发射波的强度小、次数多、放电的位置比较分散,声发射事件出现的次数和位

置都不固定，但有一个 5 s～20 s 的相对变化周期。



(a),(b),(c),(d)为典型的内部放电声发射波，(a),(c)为不同位置传感器监测到的同一次放电声发射信号((b),(d)同此)；(e),(f),(g),(h)为典型的污秽放电声发射波，(e),(g)为不同位置传感器监测到的同一次放电声发射信号((f),(h)同此)；(i),(j),(k),(l)为典型的电晕放电声发射波，(i),(k)为不同位置传感器监测到的同一次放电声发射信号((j),(l)同此)。

图 2　输电线路放电声发射波

Fig. 2　Acoustic emission wave from discharge of transmission line

2)在试验电压较低(放电较弱)时，绝缘子污秽放电声发射信号的幅值较小，信号持续的时间较短，即使在某个周期出现较大的信号，也会很快消失，不会出现持续几个周期的大信号；当试验电压升高(放电增强)时，信号幅值增大，信号持续的时间(包络线围成的面积)增大，大信号持续出现的工频周期数增大；继续增加电压后，工频正半周期内的声发射事件更强，工频负半周期的事件更多，在时间轴上连成一片，很难找到放电声发射的间歇期，直至发生闪络。

污秽放电声发射波的外形呈鸟巢状。

3.3　电晕放电声发射波

当绝缘子串中出现低值或零值绝缘子时，正常绝缘子上承担的电压上升，超过临界值，由于绝缘子串上电压的鞍形分布，在某些正常绝缘子的局部尖端上将出现电晕放电现象。图 2(i)～(l)分别示出了绝缘子在23 kV，25 kV 时的电晕放电声发射波。图 2(i)，(k)为一组(图 2(j)，(l)为一组)，分别对应通道 1(传感器靠近绝缘子悬空)和通道 2(传感器紧贴绝缘子表面)测得的波形。

随电压的升高，不良绝缘子开始出现电晕声，当增加电压后，示波器通道 1 可以检测到稳定的电晕声发射波，由于电晕时尖端对周围的空气放电，其波动很难传到固定在绝缘子本体上的传感器中去，因此通道 2 检测到的只有电晕产生的电脉冲信号，只有当电晕很强时，通道 2 才检测到声发射信号。电压越高，检测到的声发射波的峰峰值、均方根值都随之增加，电晕声也随之加强；电晕放电声发射波也具有周期性，每工频周期 2 次，一次的强度大、持续时间短，另一次强度小、但持续时间相对较长，在外加电压负的最大值附近，声发射信号间等时间间隔，每次事件的峰值也大致相等。

电晕声发射波的外形呈杆状。

4　输电线路混合放电及其声发射

就单个洁净绝缘子而言，一般在加压 10 kV 以下时，检测到的是绝缘子内部缺陷放电。就单个污秽绝缘子而言，根据污秽的严重程度，一般在 10 kV 以前，就可以检测到污秽放电声发射波，污秽越严重，起始放电电压越低。

试验中检测到的经常是混合放电声发射信号。例如，低值绝缘子的内部缺陷放电经常和绝缘子表面对探头间的放电结伴而行。当空气的湿度很高时，在低值绝缘子发生内部放电的同时，可能还会出现绝缘子表面对探头间空气隙的放电，参见图 3(c)中通道 2 的波形，从图中可见，在每工频周期 2 次内部放电(箭头状的波形)的中间，又出现了 1 次探头空气隙间的尖脉冲状的放电声发射波。例如，当电压很高时，可能会出现另外一种情况，在工频正半周期的峰值附近和负半周期没有电晕以前，由于绝缘子本体上的电位分布，可能使探头外壳的电位较高，从而导致传感器外壳和探头间的气隙出现放电，结果会出现电晕放电、外壳与探头间的空气隙放电共存的局面。实际上，绝缘子放电试验中检测到的大多属于 2 种或多种放电的混合声发射波。

当绝缘子污秽很严重，或者空气比较湿润，或者传感器的探头离正电极太近，或者外加电压高到一定程度后，可能出现绝缘子表面对探头间空气隙的放电，于是，检测到的声发射波的幅值急剧增加，每

工频周期出现 1 次声发射事件。典型的绝缘子外壳和探头间的空气间隙击穿放电声发射波如图 3(b),(d)所示,从图中可见,对探头放电的声发射波呈尖脉冲状,幅值极高,可达到 10 V 以上,其幅值随绝缘子上的外加电压的增加而升高。

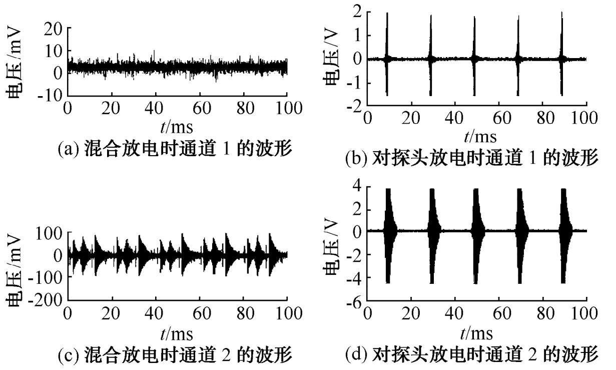


图 3 绝缘子混合放电声发射

Fig. 3 Acoustic emission wave from blend discharge

而当电压超过 12 kV 后,可能出现绝缘子表面尖端或突起的电晕放电,电晕放电出现在电压为负的最大值附近,每工频周期出现 1 次,且放电间隔相等,放电的幅值大致相同。这就是试验中检测到的标准的每工频周期出现 1 次的声发射波。

5 其他放电及其声发射

严重接触不良时的典型放电波形如图 4(a)所示。从图中可以看出,当电源接触不良时,也会出现放电声发射波,并且此声发射波也具有周期性,与绝缘子电晕放电声发射波很相似。

输电线路近区的雷声可能会被声发射传感器接收,从而出现装置误判现象。图 4(b)是中国科学院监测到的雷电声发射波,雷声主要包含几 kHz 以下的频率成分;另外,雷声中最常见的隆隆声的特征频率主要包含 100 Hz 以下的频率成分。

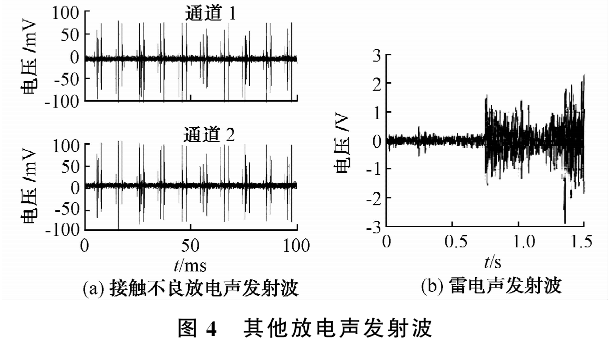


图 4 其他放电声发射波

Fig. 4 Other acoustic emission wave from discharge

声波在传播过程中会衰减,高频成分比低频成分衰减得快得多,因此雷声中高频成分传播的距离较短。采用滤波措施后,一般可消除远处雷声的影响,但是,当雷电发生在声发射监测系统附近时,雷声中高频成分还是会被监测系统接收,此时利用长延时监测判据,判断声发射信号是否具有周期性,就可以区分雷电声发射波和输电线路放电声发射波。

6 结语

发生在输电线路上的放电有绝缘子的内部放电、绝缘子表面污秽放电、导线的尖端电晕以及接触不良放电等多种形式,试验发现这些放电都伴随有声发射波,并且能够被特制的检测系统检测到,通过对这些局部放电伴随声发射波的在线监测和分析,可以判断放电的发生,并进行绝缘估计。

试验发现,出现突变的电信号的同时,必然伴随声信号,二者一一对应,电脉冲的持续时间是纳秒级,而声发射波持续的时间在微秒级。利用对应的电信号和声信号到达检测设备的相位差,可以实现输电线路放电源的声发射定位。

输电线路放电声发射波呈现规则的周期性,对应工频正半周期和负半周期内各出现 1 次声发射事件,而不同形式的放电伴随声发射波的外形和对称性上存在显著的差别。分析不同放电形式对应的声发射波的特征,利用它们之间的差别,可以有效地识别不同形式的放电并进行故障诊断。

输电线路上还会出现混合放电的情况,此时监测到的是混合放电中每种简单放电伴随声发射信号的叠加。输电线路附近的雷电也会被声发射传感器接收,利用信号是否具有周期性可以区分雷击信号和放电信号。

参考文献

[1] 浙江省电力公司.输电线路绝缘子运行技术手册.北京:中国电力出版社,2002.
Power Supply Company of Zhejiang Province. Technique handbook for insulator operation of transmission line. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[2] 杨振东,舒乃秋,王文志,等.绝缘子污秽放电声发射监测方法研究.电力自动化设备,2005,21(7):35-37.
YANG Zhendong, SHU Naiqiu, WANG Wenzhi, et al. Acoustic emission detection methods monitoring insulator pollution flashover. Electric Power Automation Equipment, 2005, 21(7): 35-37.

[3] 黄新波,刘家兵,王向利.基于 GPRS 网络的输电线路绝缘子污秽在线遥测系统.电力系统自动化,2004,28(21):92-99.
HUANG Xinbo, LIU Jiabing, WANG Xiangli. On-line remote-monitoring system for transmission line insulator contamination

based on the GPRS net. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 92-99.

[4] 赵汉表,林辉,谢利理.基于高压侧测量的输电线绝缘子泄漏电流在线监测系统.电力系统自动化,2004,28(22):78-82.
ZHAO Hanbiao, LIN Hui, XIE Lili, On-line monitoring system on measuring leakage current near HV side for electrical transmission line insulators. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 78-82.

[5] 蔡伟,李敏,杨颜红.污秽绝缘子在线监测系统的设计与实现.电力系统自动化,2002,26(17):45-48.
CAI Wei, LI Min, YANG Yanhong. On-line monitoring system for polluted insulator based on telemetry. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 45-48.

[6] 李敏,蔡伟.超高压输电线路铁塔静态图像遥测技术应用.电力系统自动化,2004,28(18):45-49.
LI Min, CAI Wei. Still image remote monitoring upon EHV power towers. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 45-49.

[7] 张占龙,李冰,杨霁,等.微波感应式电力线防盗在线监测系统.电力系统自动化,2006,30(22):93-95.
ZHANG Zhanlong, LI Bing, YANG Ji, et al. On-line monitoring system of electric power line guard against theft by microwave induction. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 93-95.

[8] 焦尚彬,刘丁,郑岗,等.基于遥测技术的输电线路绝缘子污秽在线监测系统.电力系统自动化,2004,28(15):71-75.
JIAO Shangbin, LIU Ding, ZHENG Gang, et al. On-line insulator contamination monitoring system for transmission lines based on telemetry. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 71-75.

[9] PHILIPS A J, MELAIA R. Ultrasonic emissions from non-ceramic insulators with defects// Proceedings of 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering: Vol 4, Aug 23-27, 1999, London, UK. Stevenage, UK: IEE, 1999: 131-134.

[10] VARLOW B R, AUCKLAND D W, SMITH C C, et al. Acoustic emission analysis of high voltage insulation. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1999, 146(5): 260-263.

[11] 邱昌容,王乃庆.电工设备局部放电及其测试技术.北京:机械工业出版社,1994.
QIU Changrong, WANG Naiqing. Partial discharge of electric apparatus and its test technique. Beijing: China Machine Press, 1994.

[12] 张仁豫.绝缘污秽放电.北京:水利电力出版社,1994.
ZHANG Renyu. Contaminant discharge of insulation. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1994.

[13] 王成江,舒乃秋,李明.一种用于检测真空灭弧室内部放电的超声传感器.传感器技术,2003,22(9):53-55.
WANG Chengjiang, SHU Naiqiu, LI Min. An ultrasonic sensor for detecting the internal discharge of vacuum quenching pot. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(9): 53-55.

[14] 王成江,贾智斌,顾玉凯,等.绝缘子放电声发射识别的试验研究.高压电器,2005,41(4):260-264.
WANG Chengjiang, JIA Zhibin, GU Yukai, et al. Experimental research of acoustics emission identifying to discharge from insulators. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 260-264.

王成江(1971—),男,副教授,硕士生导师,主要从事电力设备状态监测和故障诊断、电力市场和数据库系统等方面的研究与开发工作。E-mail: cj-wang@ctgu. edu. cn

戴　迪(1983—),男,硕士研究生,主要从事电力设备在线检测方面的研究。

杨　溢(1970—),男,高级工程师,主要从事输电线路的运行、检修和维护等工作。

Experimental Research on Acoustic Emission of Discharge from the Power Transmission System

WANG Chengjiang[1], *DAI Di*[1], *YANG Yi*[2]

(1. Three Gorges University, Yichang 443002, China)

(2. Wanzhou Power Supply Bureau, Chongqing 404000, China)

Abstract: During the discharging process of the power transmission system, the electric impulses, the acoustic emission (AE) waves and the relation between them are studied by experiment in laboratory. Based on a large number of experiments the common characteristics of the AE wave of the interior discharge from the insulator, contaminant discharge from the insulator, corona from the transmission line, discharge from bad contact and thunderbolt are summarized, respectively. It is found that the discharge source can be located by means of the phase-shifting between the electric impulse and the acoustic emission wave of the same discharge. The type of discharge can also be identified through the difference in periodicity, the shape and the symmetry of the AE wave of discharge from the power transmission system.

This work is supported by Natural Science Foundation of Department of Education, Hubei Province (No. D200613004).

Key words: power transmission system; discharge; acoustic emission; location; identification