

文章编号:1000-582X(2009)10-1150-04

# 发电机定子绕组局部放电超声波在线定位分析

汪泉弟, 杨承河, 杨永明, 张宇鹏, 陆俊杰

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**通过实验分析了局部放电超声波信号在发电机定子内的传播特性以及该超声信号和发电机正常运行时背景噪声信号的区别,证明超声波对发电机定子绕组局部放电点的在线定位是可行的。为实现无盲区监测,将发电机定子按一定比例分成数等份。通过电-声检测法建立局部放电定位方程组,利用遗传算法对方程组进行仿真优化计算。仿真计算结果表明,提出对发电机定子局部放电的定位方法是正确的。

**关键词:**局部放电;超声定位;发电机定子;遗传算法

**中图分类号:**TM930.9

**文献标志码:**A

## Analysis on the ultrasonic online location for partial discharge in the stator winding of generator

WANG Quan-di, YANG Cheng-he, YANG Yong-ming, ZHANG Yu-peng, LU Jun-jie

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The propagation characteristics of the partial discharge's ultrasonic signal in the stator of generator and the difference between the ultrasonic signal and the running background noise are analyzed with experiments. Ultrasonic online location for partial discharge is proven to be feasible. For non-blind area monitoring, the stator is divided into several equal parts. Locating equations are established with electroacoustic detection method and optimized with genetic algorithm. The simulation results indicate that the proposed method of ultrasonic online location for the partial discharge in the stator of generator is correct.

**Key words:** partial discharge; ultrasonic locating; generator stator; genetic algorithm

大型发电机在运行中受电、热、机械、化学等作用以及外部环境的影响,会造成定子绕组基础绝缘层松脱、剥离,外半导体屏蔽层刮擦,绕组紧固件松动等引起局部放电,局部放电会加速绝缘劣化并最终导致整个绝缘击穿<sup>[1-2]</sup>。大型发电机的损坏,将会造成停电事故,甚至危及电力系统安全。因此,对大型发电机进行局部放电定位在线监测是非常必

要的。

大型发电机在线监测一般采用电测法,发电机定子局部放电主要有 4 种类型:内部放电、端部放电、槽间放电和断股放电。4 种放电类型形成的机理不同,放电强度也有所不同,电测法可确定放电类型,但不能确定放电的具体位置<sup>[3-4]</sup>。

参考变压器局部放电超声波定位方法,采用超

收稿日期:2009-06-04

基金项目:重庆市自然科学基金计划重点资助项目(CSTC2007BA3001)

作者简介:汪泉弟(1954-),女,重庆大学教授,博士,主要从事无线传感器网络在电气工程中的应用、电磁场数值计算及电磁兼容技术,(Tel)023-65112607;(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn.

声波传感器电-声联合检测法对发电机定子局部放电点进行定位。为实现无盲区监测,将发电机定子按一定比例分成数等份,超声传感器则安放在定子外壁上。通过电-声检测法建立局部放电定位方程组,利用遗传算法对方程组进行仿真优化计算,最后得到准确的局部放电具体位置。

### 1 局部放电超声波在线定位的可行性

以北京电力设备总厂 1999 年生产的发电机(型号 MF-15)为实验对象,该发电机定子外圆直径 850 mm,内圆直径 600 mm,定子长度 800 mm。接收局部放电超声波信号的超声波传感器(探头型号 FC16K40R,中心频率 40 kHz)安放在发电机定子外壁上,利用电打火器在定子两端模拟局部放电信号,如图 1 所示。其中,超声波传感器安放在位置 1,其它各点为局部放电点的位置。

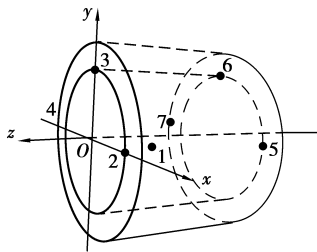


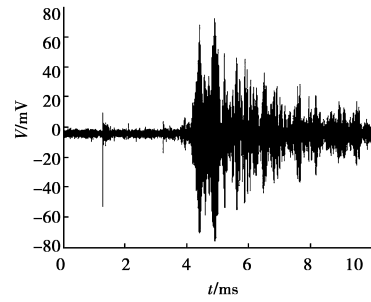
图 1 传感器安放点及局部放电点位置示意图

在位置 1 处均能收到 6 个放电点的超声波信号,超声信号在定子中传播随着距离增大而明显衰减。图 2 是在位置 5 和位置 7 处发生放电后,传感器在位置 1 接收到的超声信号。位置 5 和位置 7 分别距离位置 1 约 750 mm 和 2 600 mm。

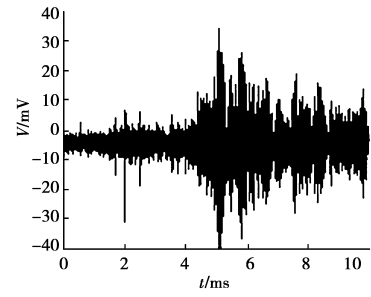
启动发电机测试发电机的背景噪声。图 3 是从示波器上看到的发电机正常运转时产生的背景噪声,背景噪声随工频周期有规律地出现,并且每个周期内固定有 8 个波峰。

对定子内传播的局部放电超声波信号和背景噪声做频谱分析,如图 4 所示。由图 4(a)可见,背景噪声在各频段上分布均匀,在靠近传感器中心频率时稍有增大,这是由传感器中心频率灵敏性引起的。局部放电的频谱集中在 40~200 kHz<sup>[5]</sup>,实验获得的局部放电超声波信号频谱 40 kHz 附近的幅值远大于背景噪声在该频段的幅值,如图 4(b)所示。

通过上述实验可得 2 点结论:①局部放电超声波信号在发电机定子内有很好的传播特性;②局部放电超声波信号能够清晰地从发电机正常运行时的背景噪声中区分出来。因此,通过电-声联合监测发



(a) 位置 5 处接收到超声信号



(b) 位置 7 处接收到超声信号

图 2 传感器接收到局部放电超声波信号

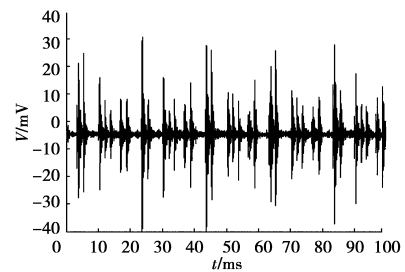
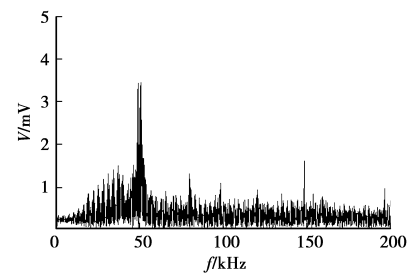
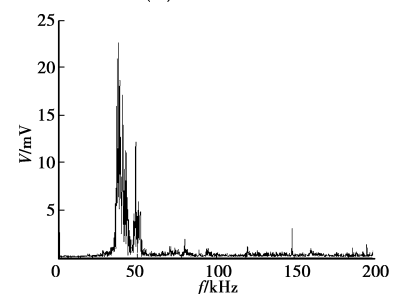


图 3 发电机正常运转时的背景噪声



(a) 背景噪声频谱



(b) 局部放电超声波频谱

图 4 发电机正常运转机械噪声频谱和定子局部放电超声波信号频谱

电机定子局部放电是可行的。

## 2 定子绕组局部放电超声波定位方法

### 2.1 发电机定子分区

由于发电机定子是圆筒形,且发电机定子铁芯与绕组线棒紧密连成一体,因此,分析超声波在定子内传播时可把定子看成是介质均匀的圆筒,图 5 为简化后的发电机定子。

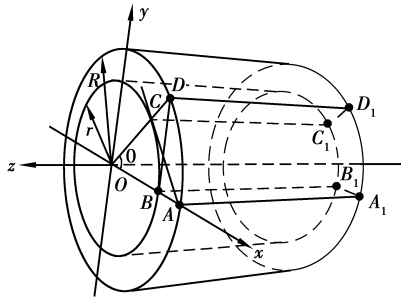


图 5 发电机定子简图

为了方便定位,将发电机定子分成若干个区间。以图 5 例,设定子外圆半径为  $R$ ,内圆半径为  $r$ ,在  $xoy$  平面上,外圆与  $x$  轴相交于  $A$  点,内圆与  $x$  轴相交于  $B$  点,从  $A$  点作内圆切线  $AC$  相切于  $C$  点,作直线  $OC$  相交外圆于  $D$  点,连接  $DB$  两点作直线,可以证明  $DB$  也是内圆的切线。过  $A、B、C、D$  四点作平行  $Z$  轴直线相交于定子另一端边沿  $A_1、B_1、C_1、D_1$ 。若在定子外圆弧面  $AA_1D_1D$  上安装超声传感器,则可在  $ABCD-A_1B_1C_1D_1$  区内任意一点直线达到外圆弧面  $AA_1D_1D$ ,这样便可无盲区的检测到  $ABCD-A_1B_1C_1D_1$  区内的任意一点局部放电超声信号。由图 5 可得  $ABCD-A_1B_1C_1D_1$  区对应的角度为

$$\theta = \angle BOC = \arccos\left(\frac{OC}{OA}\right) = \arccos\left(\frac{r}{R}\right), \quad (1)$$

为了能利用最少的超声传感器对整个发电机定子绕组实现无盲区监测,可把定子分为  $n = \left\lfloor \frac{2\pi}{\theta} \right\rfloor$  个区域,把超声传感器安放在各个区域边界上,所需要的超声传感器数量  $N$  由下式决定:

$$N \geq \begin{cases} \frac{3}{2}n, & \text{当 } n \text{ 为偶数;} \\ \frac{3n+1}{2}, & \text{当 } n \text{ 为奇数。} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 定子绕组局部放电 3 点定位法

采用电-声联合监测法在线检测发电机定子绕组局部放电脉冲电流信号和超声波信号,脉冲电流信号在定子中的传播速度与光速接近,而声波在线棒中的传播速度  $1\,500 \sim 5\,000 \text{ m/s}$ <sup>[6-9]</sup>,因此,以电流传感器收到脉冲电流信号为声波开始传播的起始

时间,超声波传感器收到信号的时间为终止时间,通过超声等值声速乘上时差便可得声波传播的距离。声波在发电机定子内以球面波的形式从局部放电点以最短路径传播到定子表面的接收点,通过式(1)将发电机定子分为数等份,利用三点定位方法在各等份内建立时延与传播距离关系的球面方程,解出方程的根,即可得局部放电点<sup>[10-11]</sup>,如图 6 所示。

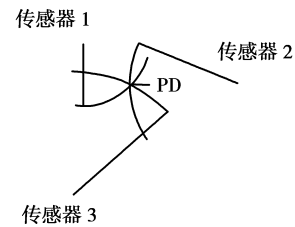


图 6 3 点定位原理图

### 2.3 定子绕组局部放电超声定位优化

以 3 路超声波信号进行定位计算来说明优化问题。设 3 个超声传感器在定子外圆壁的坐标分别为  $D_1(x_1, y_1, z_1), D_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $D_3(x_3, y_3, z_3)$ , 3 路超声信号的时延为  $t_1, t_2, t_3$ 。3 路超声的等值波速为  $v$ ,假设局部放电点位置为  $D(x, y, z)$ ,根据时差与距离的关系建立球面方程如下<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 - (vt_1)^2 = 0; \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 - (vt_2)^2 = 0; \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 - (vt_3)^2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中  $x, y, z$  取值范围由发电机定子半径和长度决定。以图 5 为例,  $-R \leq x \leq R, -R \leq y \leq R$ , 以及  $0 \leq z \leq L$ 。由于测量各路时间和取得的等值声速和真实值存在一定误差,3 路超声波传感器检测到的局部放电点并不一定重合,而是以 3 个传感器为中心,传播距离为半径球体相交处的某一区域,若采用传统的消元法解式(3)很可能无解,因此需对式(3)采用优化方法来逼近局部放电点,故建立如下优化问题:

$$\min f(x, y, z) = \left| \frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 - (vt_1)^2}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 - (vt_2)^2} \right| + \left| \frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 - (vt_2)^2}{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 - (vt_3)^2} \right|, \quad (-R \leq x \leq R, -R \leq y \leq R, 0 \leq z \leq L). \quad (4)$$

采用遗传算法对式(4)进行优化,显然,式(4)优化问题的全局最优解,即局部放电在定子内的具体位置<sup>[14-15]</sup>。

### 3 局部放电超声波定位仿真实验

仿真实验在 Matlab6.5 上安装的遗传算法工具箱 gaotV5 上进行。设发电机定子外圆半径、内圆半径和长度分别为 1 000、800、2 000 mm,声波在定子中传播的等值声速为  $v=2$  m/ms。应用式(1)算出  $\theta=36^\circ$ ,于是可把定子分成 10 等份,用 15 个超声波传感器就可以对整个定子实现无盲区监测。为使超声波传感器信号线尽可能短且引出方便,将其安置在定子两端,在其中一端的每个分区边界上安放一个超声波传感器,另一端则隔一个分区边界安放一个,这样每个分区均有 3 个超声波传感器,却总数最少,如图 7 黑色圆点所示。

设区域 1 出现局部放电,放电位置为  $D_p(850, 350, -600)$ ,监测区域 1 局部放电的传感器位置分别为  $D_0(1\ 000, 0, 0)$ ,  $D_1(809, 587.8, 0)$ ,  $D_2(809, 587.8, -2\ 000)$ ,局部放电点到各个传感器的时间:  $t_0=0.355\ 3$  ms,  $t_1=0.323\ 4$  ms,  $t_2=0.710\ 3$  ms。将传感器坐标、传播时间和等值声速代入式(4),利用遗传优化算法进行编程计算。由于遗传算法是对局部放电点的逼近,为了减少误差,可对多次计算结果取平均值,运算 10 次取平均值后确定局部放电点位置为  $D_p(845.3, 347.6, -601.8)$ ,与实际放电点相对误差小于 1%,已满足实际工程所需的精度。局部放电的定位精度取决于等值声速的精度和局部放电点到各个传感器波速的时差。在实际监测发电机时,可隔一段时间测一次等值声速和用抗干扰较好的传感器来提高测量的精度。

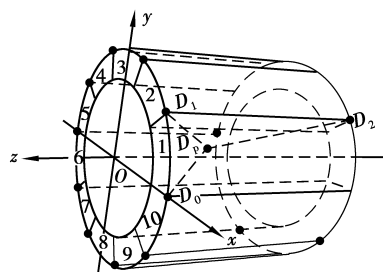


图 7 传感器的安放图

在监测发电机局部放电时可能存在多个局部放电点同时放电,多个局部放电点又分为利用式(1)划分不同区域里的单点放电和同一区域里的多点放电。对在不同区域里单点放电,可把传感器按一定的顺序排放根据接收到声音幅值大小来确定在哪个区域。对于同一区域多点放电可利用多重信号分类算法,但实现比较复杂<sup>[16]</sup>。

### 4 结 论

1)由发电机绕组局部放电实验研究得出,局部放电产生的超声波在定子里有良好的传播特性,并能从发电机正常运行背景噪声中区分出来,因此把超声波传感器安放在发电机定子外壁上监测绕组的局部放电是可行的。

2)将发电机定子划分为若干个等值区,在各分区边界上安放超声波传感器可实现无盲区监测,且所需传感器数量最少。

3)对 3 点定位法建立的优化方程采用遗传算法求解,可迅速获得全局最优解,准确计算出发电机定子绕组的局部放电位置。

#### 参考文献:

- [1] HUDON C, BELEC M. Study of slot partial discharges in air-cooled generators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15 (6): 1675-1690.
- [2] ZHI D J, XIANG P, LI M W. Evaluation of the degradation of generator stator ground wall insulation under multistresses aging [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 474-483.
- [3] 杜林. 大电机主绝缘局部放电测量及老化特征研究 [D]. 重庆:重庆大学电气工程学院, 2004.
- [4] EMERY F T. Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 347-361.
- [5] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [6] 孙翔, 郝艳捧, 高乃奎. 发电机定子线棒绝缘超声波速的研究 [J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 16-18.  
SUN XIANG, HAO YAN-PENG, GAO NAI-KUI. Study on the ultrasonic velocity of generator stator insulation [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 16-18.
- [7] BOZZO R, GEMME C, GUASTAVINO F, et al. Localisation of partial discharge sites on power generator bars by means of ultrasonic measurement [C] // 1997 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa, Canada: IEEE, 1997: 658-663.

(下转第 1168 页)

- vertical walls [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49:503-511.
- [9] OSORIO A, AVILA R, CERVANTES J. On the natural convection of water near its density inversion in an inclined square cavity [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004, 47: 4491-4495.
- [10] CAWLEY M F, MCGLYNN D, MOONEY P A. Measurement of the temperature of density maximum of water solutions using a convective flow technique [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 1763-1772.
- [11] CAWLEY M F, MCBRIDE P. Flow visualization of free convection in a vertical cylinder of water in the vicinity of the density maximum [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 1175-1186.
- [12] FUNAWATASHI Y, OHTA S, SUZUKI T. Three-dimensional structure of natural convection of water near the density extremum within a horizontal annulus [J]. *Thermal Science&Engineering*, 2004, 12 (4): 29-30.
- [13] 李恒,白博峰,陆军,等. 圆柱腔体内水凝固过程对流实验研究[J]. *工程热物理学报*,2006, 27(6): 977-980.  
LI HENG, BAI BO-FENG, LU JUN, et al. Experimental study of thermal convection during the water solidification process in cylinder cavity [J]. *Engineering Thermophysics*, 2006, 27(6): 977-980.
- [14] MING I, GUEY L. Maximum density effects on natural convection of micropolar fluids between horizontal eccentric cylinders [J]. *Int J Engng Sci*, 1998, 36(2):157-169.
- [15] 彭岚,刘渝,李友荣,等. 水平环缝内冷水自然对流换热过程的数值模拟 [J]. *重庆大学学报*,2008, 31(6): 623-626.  
PENG LAN, LIU YU, LI YOU-RONG, et al. Numerical simulation on natural convection of water near the maximum density in horizontal annulus [J]. *Chongqing University*, 2008, 31(6): 623-626.
- (编辑 陈移峰)
- 
- (上接第 1153 页)
- [8] YAN P H, HENG K X, GUO L W. Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10 (3): 539-547.
- [9] HENG K X, YUE B, HAO Y P. Diagnosis of stator winding insulation of large generator[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 274-277.
- [10] 马小芹,马晓薇,项添春,等. 声技术在大型发电机主绝缘检测中的应用进展[J]. *大电机技术*, 2003(6): 5-9.  
MA XIAO-QIN, MA XIAO-WEI, XIANG TIAN-CHUN, et al. Acoustical technology applications in the detection of large generator stator insulation[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2003(6): 5-9.
- [11] WANG B B, YANG Y. On-line measurement of transformer partial discharge[C]// *International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops*. Harbin: IEEE, 2007: 906-909.
- [12] LI J T, RI C L, MIN D, et al. Study of partial discharge localization using ultrasonic in power transformer based on particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008 (15): 492-495.
- [13] LI M, ZHAO H, ZHANG J. Fiber fabry-perot sensors based acoustic detection of partial discharges in power transformers[C]// *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Gui Lin: IEEE, 2006: 254-257.
- [14] 周力行,李卫国,邓本再. 基于混沌遗传算法的变压器局部放电源点定位新方法[J]. *长沙电力学院学报*, 2004, 19(1): 43-46.  
ZHOU LI-XING, LI WEI-GUO, DENG BEN-ZAI. A new method of locating the partial discharge sources in transformer based on chaos genetic algorithm[J]. *Journal of Changsha University of Electric Power*, 2004, 19(1): 43-46.
- [15] SHUANG Z R, XU Y, RUI H Z, et al. Ultrasonic localization of partial discharge in power transformer based on improved genetic algorithm[C]// *International Symposium on Electrical Insulating Materials Yokkaichi*. Japan: IEEE, 2008: 323-325.
- [16] LUO R C, LI W G, LI C R. Partial discharges multi-targets localization in power transformers based on array signal processing[C]// *Tencon 2005 IEEE region 10 conference*. Melbourne, Australia: Ieee, 2005: 1-4.
- (编辑 侯 湘)