

[发电机]

基于超声测量的发电机定子局部放电故障精准定位方法研究

文/张树铭

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院

发电机的定子绕组在运行中长时间承受热、电动力、机械应力及环境的影响，容易发生绝缘劣化，导致发电机的绝缘介质在运行时容易发生局部放电现象，使发电机绝缘强度下降，最终发展成绝缘失效。因此，发电机定子局部放电的精准测量和准确定位对发电机的整体绝缘状况评估和寿命预测具有十分重要的意义。对现有的发电机定子局部放电测试方法进行了简要介绍，比较分析了离线测试方法和常见的在线监测方法的优缺点，借助现有成熟的超声波测局部放电方法，提出一种利用超声测量光纤传输的发电机定子局部放电故障定位方法，并在实验室搭建故障模型，对故障定位方法成功进行了验证，具备一定的推广价值。

大型发电机的定子绕组在运行中长期承受热、电及机械应力等影响，导致绝缘劣化，容易发生局部放电。与此同时，局部放电加速绝缘介质劣化的进程，若局部放电持续发展，最终导致绝缘介质性能的破坏，使发电机定子内部产生剧烈放电。因此，一般认为局部放电是绝缘劣化的重要征兆之一。发电机定子局部放电的精准测量和准确定位对发电机的整体绝缘状况评估和寿命预测具有十分重要的意义。

研究表明，局部放电信号的相位、频率及幅度等特征反映发电机绝缘系统的状况。通过离线试验和在线监测等方式获取发电机、局部放电的特征量，评估发电机的绝缘情况，这是研究的重点。目前，国内外对发电机定子局部放电的测试方法主要分为离线测试法和在线监测法，但均难实现对局部放电超标故障点的精准定位，本文介绍现有的测试方法，比较现有方法的优缺点，基于现有方法的不足之处，提出一种新方法。

离线测试方法

发电机定子绕组局部放电测试的离线测试属于发电机的特殊试验，一般作为发电机定子绕组绝缘老化鉴定试验的子部分开展。DL/T 492—2009《发电机环氧云母定子绕组绝缘老化鉴定导则》中对试验周期的规定：

- 1) 运行年久（一般运行时间在20年以上）。
- 2) 运行或预防性试验中多次发生绝缘击穿或必要时。
- 3) 在线局部放电数据表明定子绕组绝缘有分层等老化特征的。

依据试验周期的规定看出定子局部放电试验开展周期较长，不利于对发电机状态的及时评估。

离线测试一般采取单根线棒测量或者整相测量的方法，试验回路示意图如图1、图2所示，试验原理均为采用无局部放电高压电源将被试品加到目标电压，读取被试品在目标电压的局部放电量。

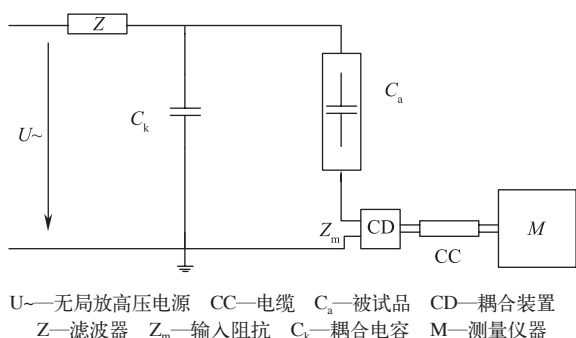


图1 单个绕组部件局部放电试验回路示意图

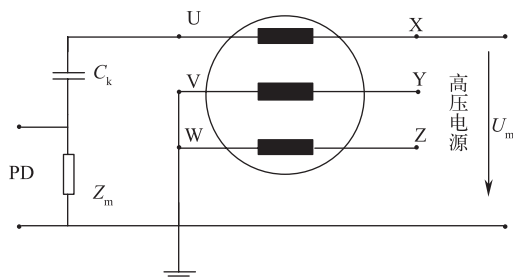


图2 整相绕组局部放电试验回路示意图

发电机定子局部放电的离线测试方法具有试验数据准确（发电机在离线状态下的局部放电噪声很低）、试验成本较低（试验设备使用常见的无局放高压电源和局部放电测量系统即可）和无须另购设备等优点。但存在如下缺点：

- 1) 基于现有的电容耦合式局部放电测量装置，试验结果易受电磁干扰，对试验结果产生影响。
- 2) 已经组装好的发电机设备，一般只能开展整相绕组局部放电试验，一旦试验结果显示局部放电电量超标，只能将故障定位到某一相，无法进一步对单根线棒和更小的范围进行故障定位。同理，即使在发电机线棒安装前对单根线棒进行局部放电测量，故障定位的范围也只到单根线棒，无法确定是线棒中哪一具体位置出现局部放电超标的情况，即无法精准定位到故障点。

在线测试方法

对于大型发电机，目前大多数采用电流脉冲法监测局部放电。根据局部放电传感器的特点及安装位置，结合工程运用中的实际效果，当前在工程中常见的大型发电机局部放电的在线监测方法主要包括中性点耦合法、便携式电容耦合法和PDA监测法。

1. 中性点耦合法

中性点耦合法是在大型发电机的中性点位置安装传感器，测量发电机的局部放电情况。一般是从发电机中性点接地电阻上引出信号，信号通过测量阻抗连接到带通滤波器，滤波器的输出接入示波器，显示放电波形。目前中性点耦合法的传感器安装主要有两种方式，如图3所示。

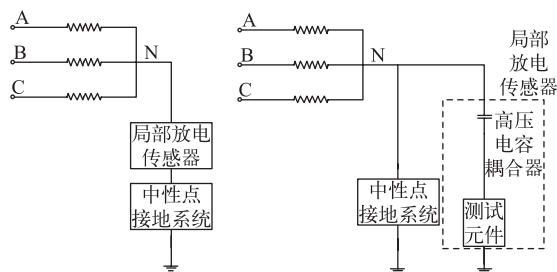


图3 中性点耦合法的两种方式

1) 电容传感器安装在发电机中性点附近，在运行中该点电压比较低，对传感器的绝缘性能要求不高，且对发电机整体系统的影响较小，安全可靠。

2) 发电机内部产生的所有脉冲都会流经中性点，因此对于发电机全部范围内的局部放电，该方法均可以监测到。

然而中性点耦合法存在信号衰减过大的缺点，因为对于大型发电机，其内部的局部放电大多发生在高压绕组，局部放电信号从放电位置传播到中性点时产生较大的衰减和变形，测量结果不够准确且易受干扰。

2. 便携式电容耦合法

便携式电容耦合法是将电容耦合器安装在发电机定子绕组高压侧的测量方法。实施方案是在发电机定子绕组高压侧并联电容器，电容器与接地电阻组合成信号传感器，电阻上的信号作为传感器的输出信号，送到带通滤波器，然后由滤波器输出接至示波器，显示发电机局部放电的情况。相较于中性点耦合法，该方法最主要的改变是将耦合电容器的安装位置由发电机中性点改成高压出线端。目前工程中一般选用80 pF的电容传感器，其具备抑噪能力强、测量结果准确、体积较小和容易安装等优点。

3. PDA监测法

PDA是局部放电分析仪的简称，PDA监测法是

在便携式耦合电容法上发展起来的。该方法主要是在发电机定子绕组上或者发电机的引出线上安装成对的80 pF的耦合电容器，局部放电信号经电缆接入到一个差动放大器中，利用绕组内的放电信号和外部干扰噪声信号在绕组传播过程中具有的不同特征来抑制噪声。由于发电机的每相各有一对耦合电容器，通过调整两个电容传感器和信号电缆的长度至合适的数值，从发电机外部来的干扰信号进入PDA后被差动放大器消除，而绕组内的局部放电信号到达PDA的时刻不同。PDA监测法安装方案如图4所示。

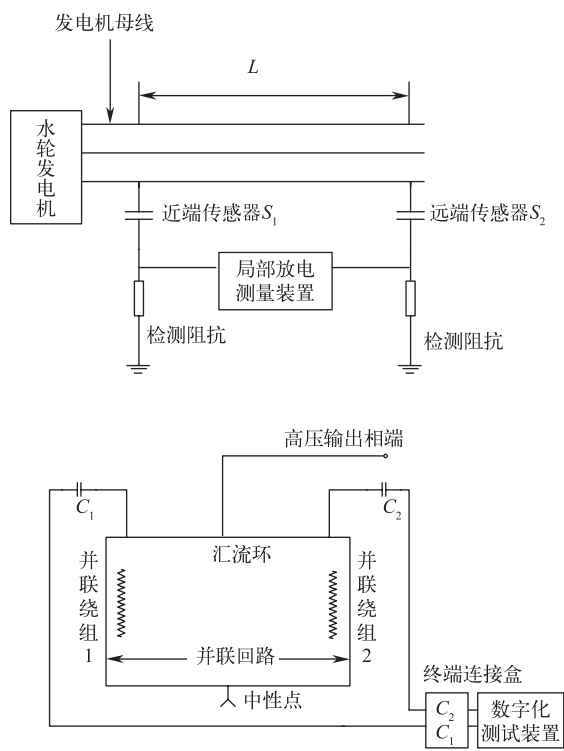


图4 PDA监测法安装示意图

PDA监测法是目前水轮发电机局部放电在线监测中较为常用的一种方法，最大的优势在于优良的消噪特性，局部放电信号和外部干扰信号便于识别，但存在以下缺点：

- 1) 由于局部放电传感器安装在发电机的高压侧，且有时需要安装多个传感器，若某个传感器击穿或者短路均会造成发电机的内部放电，因此对传感器的绝缘性能有较高要求。
- 2) PDA监测法要求两个耦合电容器之间必须保持一定的距离才能达到消噪目的，但常见的汽轮

发电机的环形母线距离较短，不满足该要求，因此该方法不适用于大型汽轮发电机的监测，多用于水轮发电机和高压电动机的监测。

常见发电机定子局部放电检测方法的优缺点见表1。从表1可以看出，离线测试法的试验成本较低、试验数据准确；在线监测法的成本较高、实时性好。两种方法均难以实现对故障的精准定位。

表1 常见发电机定子局部放电检测方法

检测方法	离线测试法	中性点耦合法	便携式电容耦合法	PDA监测法
检测时效性	离线测试，时效性差	在线检测，时效性好	在线检测，时效性好	在线检测，时效性好
实施难度	简单	较简单	较简单	较简单
抗干扰能力	一般	一般	较好	较好
故障定位能力	理论上能定位到线棒和相，投运后只能定位到相	定位到相	定位到相	定位到相

基于超声测量光纤传输的发电机定子局部放电故障定位方法

1. 技术背景

局部放电产生超声波是由于局部体积变化引起的，原理概括为：局部介质被击穿时，电流增大引起局部放电，使局部体积在短时间内增大，放电结束后，由于电流消失，局部体积冷却收缩减小，体积的变化引起了介质的疏密变化，从而形成了超声波。由于放电持续时间很短，所发射的声波频谱很宽，可达到数兆赫兹。

随着光纤技术的发展，研究人员将光纤技术和声测法相结合，提出了声-光测法。该方法采用光纤传感器，局部放电产生的声波压迫使光纤性质参数发生改变，导致光纤输出信号改变，从而测得局部放电信号。

2. 基于超声测量光纤传输的发电机定子局部放电故障定位方法研究

基于上述原理，本文提出了一种基于超声测量光纤传输的发电机定子局部放电故障定位装置及方法。故障定位装置示意图如图5所示。

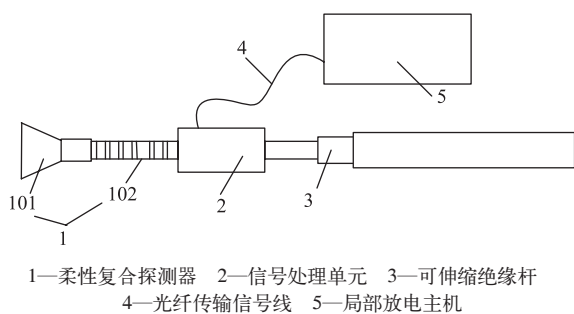


图5 故障定位装置示意图

其中，柔性复合探测器包括超声波检测探头101、连接软管102，复合探测器与信号处理单元采用柔性连接，可任意改变方向，对准局部放电部位，使用方便，操作安全可靠。信号处理单元负责将采集到的超声波信号转换为光信号；可伸缩绝缘杆的绝缘强度为100 kV，满足检测人员对发电机定子绕组进行扫描测量的要求；传输光纤一端与信号处理单元连接，另一端与局部放电主机连接。采用光纤传输，可以有效避免电磁干扰，保证试验数据的准确性。

图6为利用该方法的试验装配示意图，故障定位过程为：

- 1) 将发电机定子线棒按照顺时针编号，测量并记录定子线棒长度。
- 2) 利用无局部放电电源将发电机A、B、C三相同时升至目标电压（一般为 U_m 或者 $U_m/\sqrt{3}$ ）。
- 3) 试验装置组装完毕，测试人员手持可伸缩绝缘杆，依次对每根定子线棒（即待测发电机的定子）进行扫描测量。测量完成后，对记录的数据进行分析，形成定子线棒局部放电量-位置示意图，以便确定放电点的精确位置。

根据上述试验方法及装置，可以对发电机每根定子线棒的每个位置进行局部放电故障的精准定位。

该方法与现有方法相比，具备以下优点：

- 1) 试验方法简单。试验所需设备比较常见，在开展检测时仅需要将本装置与现有的无局部放电电源（用于施加电压）组合在一起，就实现对定子局部放电的精准定位。
- 2) 相较于传统离线测试方法，采用超声波探测器扫描的方法对发电机定子线棒的每一段进行测量，在故障定位上比传统离线测试法只能定位到某

一相更加精准。

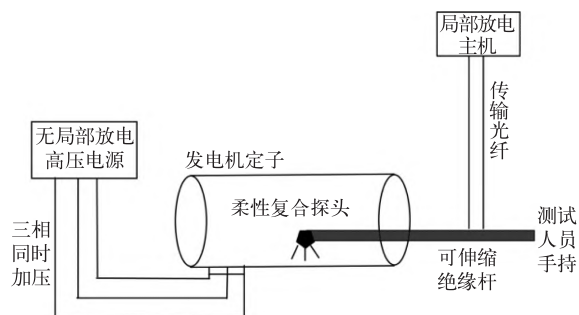


图6 试验装配示意图

3) 相较于现有的在线监测方法，该方法不仅在故障定位方面更加准确，而且对于服役时间较久的机组更加具备可实施性，由于这些服役时间久的机组在建成时一般都未加装局部放电在线监测装置，如今也很难通过技改加装局部放电在线监测装置，因此该方法可推广性较好。

3. 故障定位方法准确性验证

为进一步验证该方法在定子局部放电故障定位的准确性，在实验室利用现有的发电机定子线棒搭建了故障模型，通过实际测量结果对故障定位方法进行验证。验证故障定位的准确性利用测试仪测试，除测量故障点的波形外，还分别采集了距故障点10 cm、20 cm和40 cm处相应位置的超声波形并进行了对比。

定子线棒内部放电超声测试接线图如图7所示，对定子线棒加压后持超声传感器延线棒表面移动，测量线棒不同位置的超声波形。故障点测试波形图如图8所示，距故障点10 cm、20 cm和40 cm处相应位置的超声波形分别如图9~11所示。

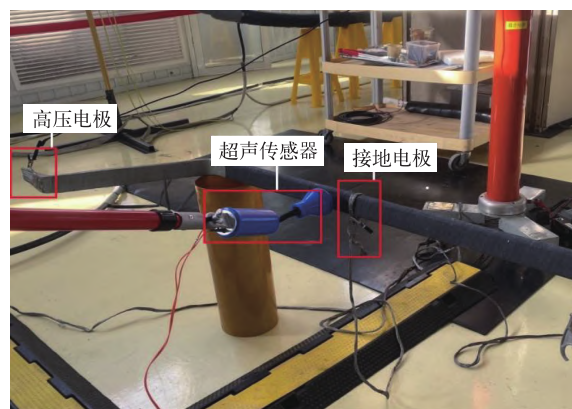


图7 定子线棒放电超声测试图

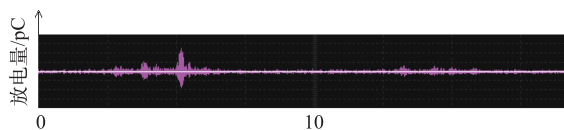


图8 定子线棒放电故障点超声测试波形图

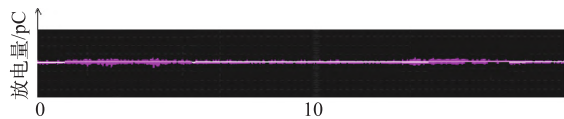


图9 定子线棒放电距故障点10 cm超声测试波形图

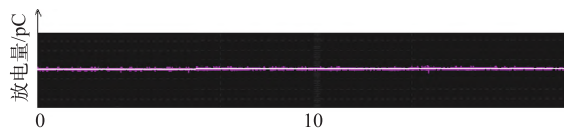


图10 定子线棒放电距故障点20 cm超声测试波形图

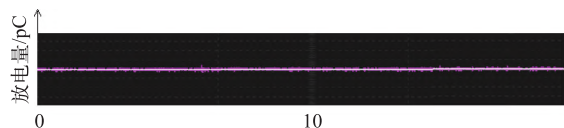


图11 定子线棒放电距故障点40 cm超声测试波形图

由上述各图可见，定子线棒内部放电故障点相对于其他点波形有明显变化，即测量位置与故障点距离越远，放电幅值越小，且随着二者距离的增加，测出的放电幅值有明显的衰减，当距离超过20 cm时，测出的放电幅值基本维持在很低的数值。

定子线棒内部放电超声波形幅值统计结果见表2。经实验室内多次故障模拟和故障试验定位，所得到的结果均与表2呈现的结果一致，可见该故障定位方法能有效辨别定子线棒放电故障点。

表2 线棒放电不同位置超声波形幅值

检测位置	故障点	距故障点 10 cm	距故障点 20 cm	距故障点 40 cm
幅值/mV	1 371	331	12	11

结束语

1) 局部放电是导致发电机绝缘劣化的重要原

因，发电机定子局部放电的精准测量和准确定位对发电机的整体绝缘状况评估十分重要。

2) 现有的发电机局部放电检测方法主要有离线试验和在线监测两种。离线测试的试验成本较低、试验数据准确；在线监测的成本较高、实时性好。但是二者均无法实现对故障点的精准定位。

3) 本文提出的基于超声测量光纤传输的故障定位方法能够对发电机定子的每一部位进行测量，从而实现对定子局部放电超标故障点的精确定位，定位效果已在工程实践中得到验证，且具备成本低、可实施性好的优点。EA

(收稿日期：2023-02-09)

参考文献

- [1] 陈宏福，黄成军，钱勇，等．发电机局部放电评估方法[J]．高电压技术，2007(8)：155-159．
- [2] 郭俊，吴广宁，张血琴，等．局部放电检测技术的现状和发展[J]．电工技术学报，2005(2)：29-35．
- [3] 张宇鹏．电气设备局部放电的超声波检测方法研究[D]．重庆：重庆大学，2009．
- [4] 郝艳捧，王国利，谢恒堃，等．基于局部放电和超声波法研究大电机定子绝缘的老化特性[J]．电工技术学报，2002(2)：1-6．
- [5] 黄成军，郁惟镛，GabePaoletti P E，等．局部放电在线监测及其在大型电机中的应用[J]．大电机技术，2000(6)：33-38．
- [6] 万元．大型发电机局部放电在线监测与分析方法研究[D]．武汉：华中科技大学，2009．
- [7] 郭召艳．大型发电机局部放电的检测与识别技术[D]．哈尔滨：哈尔滨理工大学，2008．
- [8] 陈泓岩，李浩然，杨宇豪，等．电力设备局部放电声学检测分类研究[J]．电气应用，2022，41(12)：38-43．

