



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20833—2007

## 旋转电机定子线棒及绕组局部放电的 测量方法及评定导则

The guide for partial discharge measurements and evaluation on stator bar  
and winding insulation of rotating machinery

杭州高电  
专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 电力试验工程服务

2007-01-16 发布

2007-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 旋转电机中局部放电的性质 .....	3
5 测量系统和仪器 .....	4
6 测量的可视化 .....	6
7 试验回路 .....	8
8 标准化测量 .....	10
9 试验程序 .....	12
10 试验结果的评价 .....	15
11 试验报告 .....	17
附录 A (规范性附录) 评价标准 .....	20
附录 B (资料性附录) 使用非电测量法进行局部放电的检测和定位 .....	21
附录 C (资料性附录) 局部放电在线测量 .....	22
附录 D (资料性附录) 外部噪声、骚扰和灵敏度 .....	23
附录 E (资料性附录) 噪声抑制方法 .....	25
附录 F (资料性附录) 局放数据和相位可辨识的局放模式的评价 .....	29
参考文献 .....	32

## 前 言

局部放电(PD)测量是一种评价设备绝缘优劣的灵敏方法,特别在检验新电机定子绕组绝缘质量时,可以评判绕组部件(例如,成型线圈和线棒等)及整体绕组和整体浸渍定子的绝缘质量。

目前旋转电机的局部放电测量已经为大多数人所接受,但它是从几种不同的研究发展而来的,有着多种不同的测量方法,同时也有多种不同的评定标准和分析方法。因此,需要给那些正在考虑利用局部放电测量来评价旋转电机绝缘系统的用户提供一个测量导则,以统一测量方法。

本标准主要参照 IEC 60034-27 E. 1(草案)《旋转电机定子绕组绝缘局部放电离线测量》和 IEEE 1434—2000《旋转电机的局部放电测量试用导则》。局部放电的评价标准根据国内十几家制造厂和试验单位的试验结果统计得到。

本标准附录 A 为规范性附录,附录 B~附录 F 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国旋转电机标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位:华东电力试验研究院、华东电网公司、哈尔滨大电机研究所、广东中试所、辽宁省电力科学研究所、上海汽轮发电机有限公司、山东齐鲁电机制造公司、北京北重汽轮电机有限责任公司、东方电机股份有限公司、华北电科院、湖北电试院、河南中试所、国家中小型电机检测中心。

本标准主要起草人:李福兴、徐光昶、隋银德、杨楚明、王建军、舒武庆、隗刚、董蜀元、潘庆辉、白亚民、阮羚、潘勇、张生德。

本标准为首次发布。

# 旋转电机定子线棒及绕组局部放电的 测量方法及评定导则

## 1 范围

本标准适用于电压等级 6 kV 及以上槽部有防晕层的线棒或成型线圈的旋转电机,本标准的测量方法也适用于槽部无防晕层的电机,但测试结果会有不同,本标准不涉及此评价。

本标准定义了旋转电机局部放电的术语,推荐的试验程序和仪器的一般要求、试验方法、试验结果和试验的评价标准。局部放电测量应包括下列内容:

- a) 测量系统和仪器;
- b) 试验回路的布置;
- c) 试验程序的标准化;
- d) 噪声的降低;
- e) 试验结果档案;
- f) 试验结果的评价。

本标准主要规定了使用频率在 0.1 Hz~400 Hz 的交流电源对旋转电机定子绕组进行局部放电离线测量的电气测量方法。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用本标准,然而,鼓励使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 7354—2003 局部放电测量(IEC 60270:2000,IDT)

GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分:一般试验要求(eqv IEC 60060-1:1989)

GB/T 16927.2—1997 高电压试验技术 第二部分:测量系统(eqv IEC 60060-2:1994)

IEC 60034-27 旋转电机定子绕组局部放电离线测量(草案)

IEEE 1434:2000 旋转电机的局部放电测量试用导则

## 3 术语和定义

GB/T 7354—2003 中的局部放电一般术语和定义适用于本标准,另外本标准根据 IEC 60034-27 给出适用于旋转电机局部放电测量的术语和定义。

### 3.1

**局部放电 partial discharge; PD**

导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电。这种放电可以在导体附近发生也可以不在导体附近发生。本标准中的局部放电包括:槽放电、绝缘内部放电、线棒脱壳放电和端部表面放电。

### 3.2

**离线测量 off-line measurement**

在旋转电机停机状态下进行的测量。指断开电机的电源,试验电压由一个独立的电源供应。

### 3.3

**在线测量 on-line measurement**

在旋转电机正常运行时进行的测量。



3.4

**端部防晕涂层 stress control coating**

在高压电机的定子线棒和绕组上,从槽部低阻层向端部延伸出来的用于主绝缘外面的涂层或带子。防晕层部分搭接在低阻层上,在二者之间应有良好的电气接触,以形成一个均匀的电场。

3.5

**槽部防晕层 conductive slot coating**

覆在或涂于定子线棒(线圈)槽部主绝缘外的半导体带/漆。通常称作半导体层。该层与定子铁心形成良好的电气接触。

3.6

**电阻型测温元件 resistance temperature detector; RTD**

用于定子绕组温度测量的电阻型元件,通常位于槽内上层和下层线棒之间。

3.7

**槽放电 slot discharges**

在定子槽内线圈或线棒的绝缘表面与接地铁心叠片之间发生的放电。

3.8

**绝缘内部放电 internal discharges**

绝缘内部空隙发生的放电。

3.9

**端部表面放电 surface discharges**

伸出定子铁心槽部的定子线圈或线棒的绝缘表面上发生的放电。

3.10

**脉冲高度分布 pulse height distribution**

在设定的相位间隔内,一系列幅值在一定范围内的脉冲数目。

3.11

**脉冲相位分布 pulse phase distribution**

在设定的相位间隔内,一系列相位在一定范围内的脉冲数目。

3.12

**局部放电模式 partial distribution pattern**

预先设定的时间间隔内,一系列相位和幅值在一定范围内的脉冲数目。

3.13

**耦合装置 coupling device**

耦合装置通常是指一个有源或无源的四端网络,它把输入电流转换成输出电压信号。这些信号由传输系统传给测量仪器。耦合装置的频率响应按输出电压与输入电流之比定义,其选择至少要有有效防止试验电压及其谐波频率进入测量系统。

3.14

**局放耦合单元 PD coupling unit**

一个局放耦合单元由一个低感的高压耦合电容和一个低压耦合装置串联而成。

3.15

**重复出现的最大局放值 largest repeatedly occurring PD magnitude**

$Q$

重复出现的最大局放值为由测量系统记录到的最大脉冲序列的响应(GB/T 7354—2000,4.3.3)。或者认为具有每秒10个脉冲重复率( $pps$ )的一个局放脉冲值,它可以直接从一组脉冲高度分布定量出。

## 4 旋转电机中局部放电的性质

### 4.1 局部放电的机理

通常,局部放电(PD)发生在绝缘材料介电特性不均匀的部位。在这些部位,局部电场强度可能集中。由于局部电场强度高,会导致该部位局部击穿。这种局部击穿并不会导致绝缘系统的完全崩溃。局部放电的发展一般需要一个空气穴,例如绝缘内部的、靠近导体的或者绝缘分界面的气体孔穴。

在有交流电压源的情况下,绝缘系统中某个部位的局部电场强度将随着电压升高而增加,一旦局部场强畸变超过该部位的击穿场强,局部放电就开始发生。因此在交流电压的一个周期内可能会产生大量的局部放电脉冲。

放电时传递的电荷量与不均匀介质的具体特性有密切关系,诸如尺寸、击穿电压和相关材料的特有绝缘性质(例如表面特性、气体种类、气体压力等等)。

高压电机定子绕组绝缘系统通常会有一些局部放电活动,而无机云母成分对局部放电具有固有的抵抗性。因此,在电机中出现严重的放电通常是绝缘缺陷的征兆,但不是故障的直接原因。例如制造质量问题或者服役后的劣化。然而,在特殊情况下,电机中的局部放电也可能直接损害绝缘并影响老化过程。引发故障的时间可能与局部放电水平无关,但与其他的因素有关,例如运行温度、槽楔情况、污染程度等等。

局部放电的测量和分析能有效地用于新绕组和绕组部件的质量控制以及绝缘缺陷的早期检测,这些绝缘缺陷由运行中的热、电、环境和机械应力等因素引起,并可能导致绝缘故障。

### 4.2 旋转电机中局部放电的类型

因制造工艺、制造缺陷、服役中的正常老化或非正常老化的情况,局部放电可能最终会对定子绕组绝缘系统产生贯穿性的破坏。电机设计、使用材料的特性、制造工艺、运行状况等等,会直接影响主要局部放电的大小、位置、特性、发展趋势。对于一台成型的电机,各种局部放电源可以根据他们特有的局部放电行为加以甄别和区分出来。

#### 4.2.1 内部放电

##### 4.2.1.1 内部孔穴

高压旋转电机设计在制造过程尽量使绝缘系统内部孔穴最小,但在树脂浸渍云母带绝缘系统中仍不可避免地存在一些孔穴。实际上,电机绝缘系统中的云母阻止了局部放电发展成贯穿性击穿。因此,绝缘内部孔穴只要足够小,并且未显著增大,就不会降低电机运行的可靠性。

##### 4.2.1.2 内部分层

主绝缘内的分层是由绝缘系统制造过程固化不够彻底或者受运行期间机械或热的过应力而引起的。在一个大的面积上可能发展出大面积的孔隙,从而导致相当高的能量放电,这将严重地损害绝缘。特别是,分层将减少绝缘的热传导性,并导致绝缘的加速老化甚至热击穿。因此,在评定局部放电行为时,分层应特别重视。

##### 4.2.1.3 绝缘与导体间分层

主绝缘与铜导体间的交界面处的分层是危险的,它会引引起热循环恶化,并造成导体匝间或股间的绝缘严重损坏。

#### 4.2.2 槽放电

因槽部或槽口区域的线棒/或线圈的振动,而导致导电层损坏引起的放电。例如由于沉降使槽楔松动、材料腐蚀、磨损、化学侵蚀或者制造缺陷。高压电机中的槽放电将会加快发展。在出现严重的机械损伤时,将会产生高能的放电,导致主绝缘的损坏并最终引发绝缘故障。在槽放电的发展初期,放电像是接触火花放电而不像典型的局部放电。这种接触火花放电也可以在低电位发生,例如在绕组的中性

点附近。尽管检测到的放电现象与最终的绝缘失效之间的时间无法确定,但可能会很短。因此,为了预防该损坏,在早期阶段有必要进行可靠地检测。

#### 4.2.3 绕组端部表面放电

绕组端部区域的局部放电可能集中在几个局部电场强度较高的位置。这种放电通常发生在定子绕组端部不同元件的交界面上。如果交界面设计不周、污染、孔隙、热效应等使绕组端部的防晕层失效,就不能保证电场分布均匀,线棒端部表面放电将会发展,并将逐渐腐蚀绝缘材料。虽然由于表面影响可能使局部放电行为发展相对较快,但这通常仍然是个非常缓慢的失效过程。此外,局部放电也可能发生在相间,例如在清理不干净的交界面上、在端部突出部分支撑系统的元件上,或者在绕组端部表面上对地之间的放电。

#### 4.2.4 导电粒子

导电颗粒,特别是小的粒子,例如因绕组污染引起,会在某些部位产生强烈的局部放电的。这可能会导致绝缘内出现“针孔”。

#### 4.3 绕组中的脉冲传播

局部放电发生时,局部放电电流可看成几个上升时间只有几个纳秒的瞬时脉冲。由于短脉冲的频谱较宽,而定子绕组表现为一个分布参数的试品,这就会出现行波和复杂的电容电感耦合现象及谐振现象,因此需考虑局放脉冲传播现象。由于行波的衰减、畸变、反射和交叉耦合,绕组终端所记录的局放信号波形和幅值与初始发生时不同。故旋转电机的局部放电测量需作以下几点说明。

- a) 局放源到传感器的传递函数是未知的,它取决于电机的结构,并决定了定子绕组的频率响应。局放源的能量可视作对绝缘侵蚀的程度,但它不能直接测量到。
- b) 定子绕组的特有高频传输现象所产生的终端局放信号,可视为被试电机和局放源位置的特征。
- c) 当行波通过绕组时,局放信号的特高频部分开始衰减,这与局放初始状态有关,在试品的终端上也许无法检测到。

因此,上述提到的现象不仅与定子绕组结构有关,而且与局放检测系统包括耦合装置的频率响应有关,这将大大影响绕组终端上的信号检测特征。

### 5 测量系统和仪器

#### 5.1 总则

根据 GB/T 7354—2003 要求,本标准主要描述局部放电的电气测量方法,这是因为局部放电的电气传导测量是最通常的评价旋转电机绕组绝缘的方法,非电量法测量和定位将在附录 B 中介绍。

局部放电测量系统可以分成如下几个子系统,耦合装置、传输系统(例如连接的电缆或光缆)和测量仪器以及校正装置。一般情况下,除某些信号可能会衰减外,传输系统不会对回路特性产生影响,因此对这部分不做特别考虑。

#### 5.2 测量系统频率响应的影响

局部放电检测系统(包括局部放电耦合单元)的频率响应决定了能检测到多少来自绕组的局部放电信号能量。因此,系统的频率响应,特别是使用的耦合单元的类型,对检测的整体灵敏度有相当大的影响。由于下限截止频率的不同,下列定性关系对整体绕组测量基本是适用的:

- a) 低频测量,灵敏度较高,不仅能测到线棒/线圈中近传感器的局部放电,也能测到那些源自于绕组中更远处的局部放电。然而,低频范围会较多地受到噪声和骚扰的影响。
- b) 特高频测量,只能获得局部放电全部能量一小部分,仅对源自于近传感器的信号具有较好的灵敏度。然而,这个频率范围可能较少受到噪声和骚扰的影响。



对于离线局部放电试验,为了获得源自于整体绕组的局部放电信号的合适的灵敏度,可在较高频率范围内改善信噪比,但建议使用宽带局部放电测量系统,其频率响应具有上限截止频率约 1 MHz。根据 GB/T 7354—2003,下限截止频率应该在几十 kHz 的范围。为了详细分析在终端附近发生的局部放电,可采用更广的高频范围辅助测试,以提供更有用的信息。

应该注意,绕组的结构和使用的测量回路,在局部放电测量设备的频率范围内可能发生谐振现象,因此也会影响局部放电测量结果。

### 5.3 局部放电耦合单元的影响

定子绕组的离线局部放电测量和绕组部件的局部放电试验,常常使用电容式耦合单元。它由一个高压电容和一个低压耦合装置串联构成。在测量独立的绕组部件时,耦合装置也可以与被试品串联连接(见图 5b))。低压耦合装置连接到传输系统。

高压电容、耦合装置、传输系统以及测量系统的输入阻抗表现为一个高通滤波器。因此,增大输入阻抗或者采用更高的电容值将增加灵敏度。

图 1 示意了一个理想化的局部放电脉冲的频率响应和不同的局部放电耦合单元的传输函数,耦合单元有一个高压电容器,低压侧有一个阻性测量阻抗  $Z_m = R$ 。图中标出的局部放电脉冲和耦合单元的频谱的重叠部分,表示 5 ns 的 RC 时间常数能测到的信号能量。实际情况,由于寄生电感和电容的影响,这种系统表现出带通滤波器的特性。

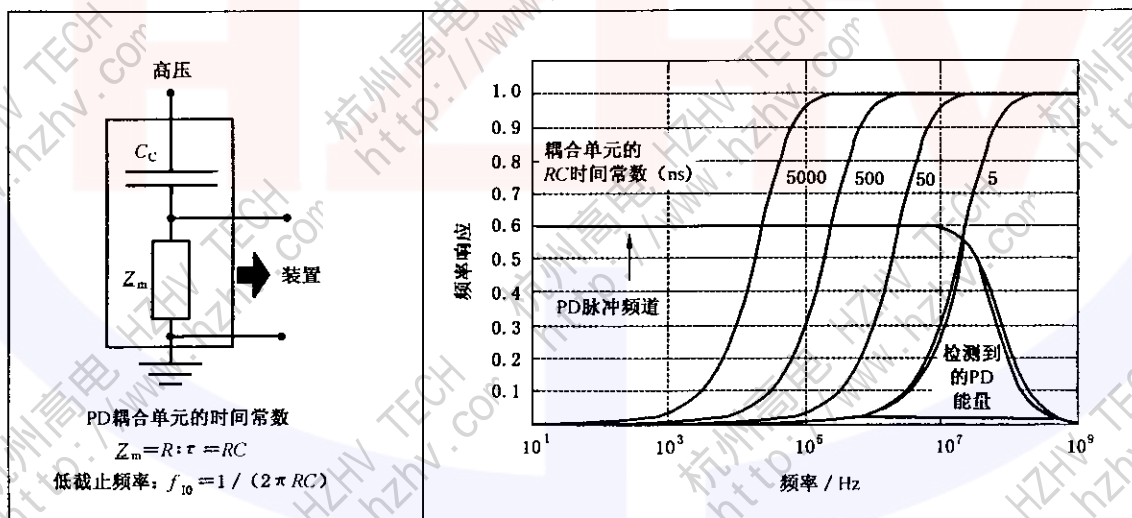


图 1 不同时间常数的耦合单元和局部放电脉冲的频率响应

## 5.4 宽带和窄带测量系统

### 5.4.1 宽带系统

根据 GB/T 7354 规定,局部放电测量系统的带宽超过 100 kHz,就定义为宽带。对旋转电机来说,宽带测量系统通常使用的频带接近 1 MHz。有些测量系统使用的频带到 500 MHz。系统的频带决定了耦合装置的频率响应和测量仪器的信号处理。

### 5.4.2 窄带系统

窄带局放测量设备的特点是频带较窄在 9 kHz~30 kHz 之间,带中心频率在至 1 MHz 频率范围内变化。在云母绝缘材料内通常会产生大量的局部放电,故振荡脉冲衰减时间长的放电会导致连续放电脉冲的互相叠加(见图 2)。这样可能会引起个别脉冲电荷的读数误差。因此窄带测量系统在旋转电机的局部放电测量上很少采用。



## 5.4.3 平方率

根据 GB/T 7354—2003 规定,平方率一般以平方库仑每秒( $C^2/s$ )表示,对大的脉冲占了很大的权重。窄带滤波器的中心频率在几个 kHz,窄频宽在几百个 Hz。滤波器的输出结果送入平方率检测仪,检测结果对按  $C^2/s$  定义超过一定水平之上用分贝(dB)表示。检测按平方率筛选,直到一限值为止。当连续的放电之间的时间随机时,该读数有偏差。在这种情况下,读数与内部放电的能量损耗成正比。

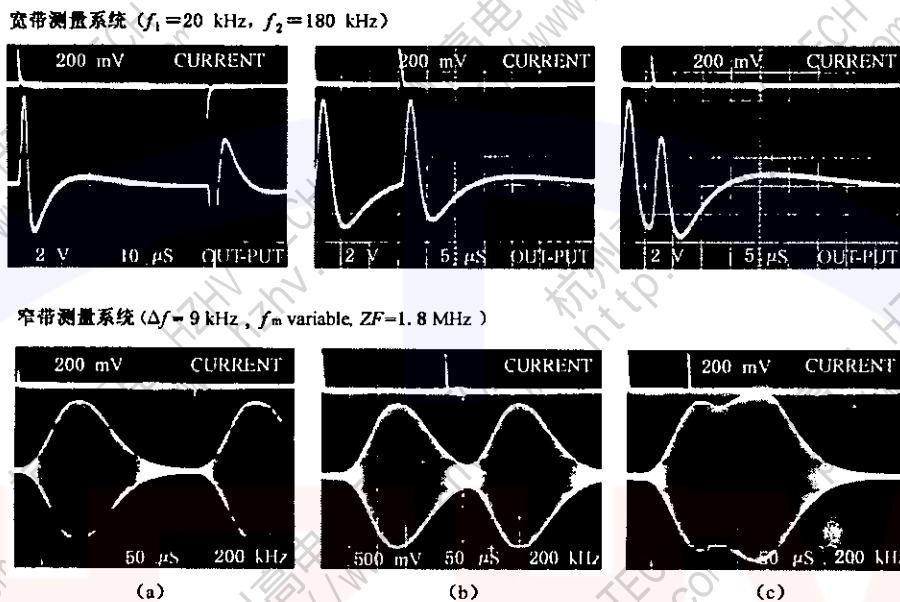


图 2 宽带和窄带局放系统的典型脉冲响应

## 6 测量的可视化

## 6.1 总则

事实上对绝缘系统进行评价,应对第 5 章中所阐述的某一种测量系统的局放数据作适当的处理。绝缘系统的损坏程度和由此造成的事故风险,直接同局放源的性质和特征有关,故有必要获取这种局放源测量的可靠信息。为此,应对局放数据采取不同类型的可视化数据处理。

## 6.2 表征局部放电数据表达的最小范畴

评价局部放电特征时,建议使用传统的局部放电测量参数:

- a) 局部放电量;
- b) 试验电压  $U$ (有效值);

局部放电量,即最大的重复出现的量值,可以用电压(mV)或视在电荷(pC)表示,并可以依照 GB/T 7354—2003 确定其数值。原则上说,用于确定局部放电量大小的测量单元是任意的。局部放电量  $Q$  与施加在绕组或绕组单元上的试验电压  $U$  相关,在从这两个参数获得的关系曲线中,不论升高或降低电压,二者的关系表示为函数  $Q=f(U)$ 。试验电压应根据 9.1.5 要求至采用持续或阶跃方式升至最高电压值,然后降至最低试验电压。

另外,依照 GB/T 7354,可以由图 3 中的曲线  $Q=f(U)$  测定试品的局部放电的起始电压(PDIV)和熄灭电压(PDEV)。起始和熄灭电压与局部放电量的规定的较低阈值有关,该阈值通常是背景噪声水平。因此,用于估计 PDIV 和 PDEV 的检测界限可能会明显地变化,它取决于试验期间的背景噪声水平。

图 3 是  $Q=f(U)$  曲线的例子。一般用电压作横坐标,局放量  $q$  作纵坐标。电压轴采用线性刻度。将电压值以预先规定的参考值,例如最大的试验电压  $U_{max}$ ,以便于比较。局放量坐标值可以是线性的或对数的,主要取决于所测局放值的范围。

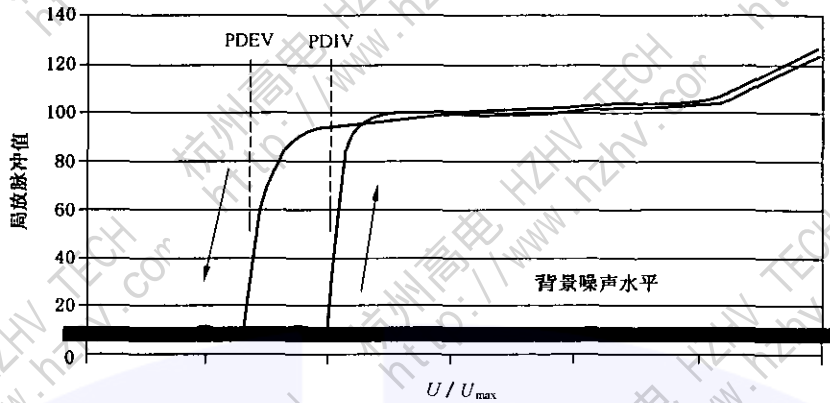


图3 局放量与正常测试电压的函数关系  $Q = f(U/U_{max})$

### 6.3 表征局部放电数据的其他方法

#### 6.3.1 总则

使用数字局部放电测量设备时,可捕获在测量时间段内局部放电发生时一系列局放脉冲的视在电荷  $q_i$ ,  $t_i$  时刻的瞬时电压值  $u_i$  或工频交流试验电压周波内的相位角  $\phi_i$ 。每次局放发生时,局部放电的测量数据被记录在测量设备上并存档,用于进行分析和处理。

依照 GB/T 7354—2003,能够从局放数据中导出其他量,比如累积电荷、放电电流、平方率、放电功率、放电能量和 NQN。然而,由数字系统导出的局放参量依赖于试验期间的特殊的仪器设置,例如触发水平等等。通过在随后的分析中使用合适的图表,能够将局放测量可视化,进而可以评估绝缘系统的状态。不论是局放参数的统计分布、单次测量的局放参数的相位离散或者时间离散表达,还是特定参数的所谓的散点图(例如脉冲高度分布、脉冲相位分布、离散相位脉冲高度分布、脉冲序列示波图、局放分布图等等),都可以用于这一目的。

有关局放模式类型的更详细信息以及用于进一步分析的局放图形可参见参考文献[2]。

#### 6.3.2 推荐的局部放电模式

局部放电模式可以看作一个局放分布图,在图上特定局放参量与散点图相关联,以便于获得关于局放源活动的信息。一般采用 2 维局放分布图表示。一种被推荐用于鉴别定子绕组绝缘系统中局放原因的局放模式是  $\phi-q-n$  模式,其中对每个单独的局放脉冲而言,以局放量  $q_i$  为纵坐标,以发生相位  $\phi_i$  为横坐标。在散点图中,可以通过采用适当的颜色标记来显示每个相位/幅值窗口内的局放发生频率。图 4 为  $\phi-q-n$  模式的一个例子。

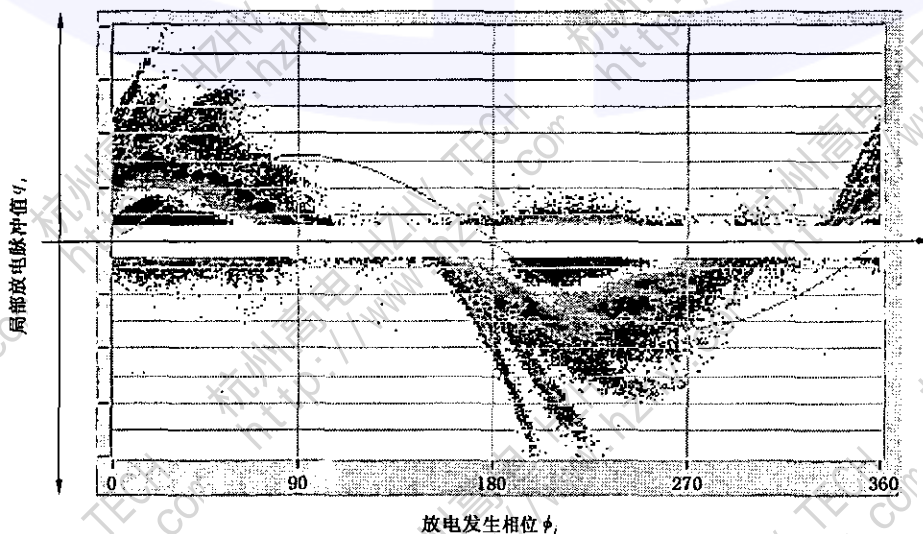


图4 一个  $\phi-q-n$  局部放电模式的例子

除了通常的  $\phi-q-n$  模式外,其他合适的局部放电测量参数也可用同样的方式来分析,并为以后的分析建立分布图。

## 7 试验回路

### 7.1 总则

局部放电测量试验回路的基本要求是为试品局放检测提供一个合适的条件,在试验回路中除试品外要求尽可能减小其他部件产生的放电。

试验回路主要包括:

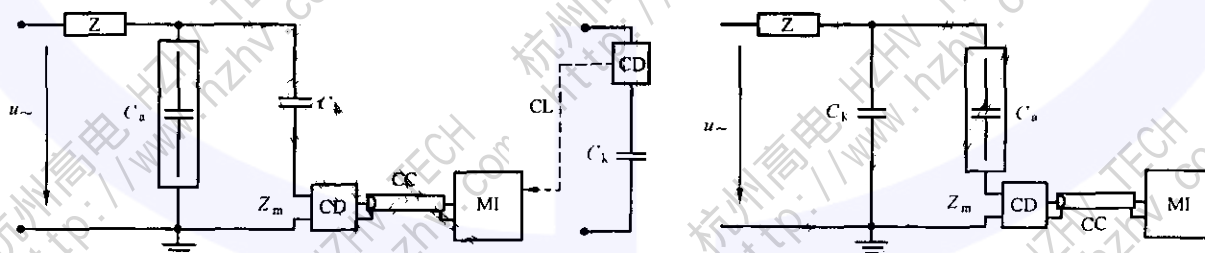
- 按照 GB/T 16927.1~GB/T 16927.2 及高压测量装置要求提供一个高压电源,高压电源在最高试验电压下产生的噪声水平不超过 100 pC。
- 1 个电压测量装置;
- 1 个合适的局放耦合单元;
- 1 根连接测量阻抗到局放测量装置电缆,该电缆要求足够低的阻尼特性和良好的屏蔽;
- 局部放电测量系统;
- 背景噪声足够低的高压连接,在最高试验电压下不超过 100 pC。

为了保证测试回路不影响试品局部放电的测量,根据 9.1.6 试验程序,试验应先将试验回路电压升至最高试验电压而无明显放电。在测试程序过程中,回路的骚扰不允许大到局部放电规定的最低起始测量值,在试品和高压电源之间接入一个阻抗或滤波器。起到衰减来自高压电源的骚扰,例如,来自试验变压器、高压导线和套管的局放,或者试验电压中的谐波进入或接近测量系统的频带干扰。另外,对外部噪声、骚扰和测量灵敏度的有关信息可参见附录 D 和附录 E。

整个测试回路要求是低感回路,接地连接建议采用低感连接。

### 7.2 单个绕组部件

对单个绕组部件(定子线棒,线圈等)的局部放电测量推荐使用符合 GB/T 7354—2003 中的两个基本试验回路(见图 5)。



a) 耦合装置 CD 与耦合电容器串联

b) 耦合装置 CD 与试品串联

- $u\sim$ ——高压电源;
- CC——连接电缆;
- $C_s$ ——试品;
- CD——耦合装置;
- Z——滤波器;
- $Z_m$ ——测量系统输入阻抗;
- CL——光连接;
- $C_k$ ——耦合电容器;
- MI——测量仪器。

图 5 基本的试验回路

在图 5a) 的试验回路中,低电压的耦合装置接在耦合电容器的接地侧。这种接法的优点是适用于接地试品,试品直接接到高压端和大地之间。在这种情况下如果发生绝缘事故,测量设备上不承受高压。



在图 5b) 的试验回路中, 耦合装置接在试品的接地侧。试品的低压侧同大地隔离。对小电容的试品来说, 这个试验回路的灵敏度比图 5a) 回路要好。图 5a) 图 5b) 中的局放测量信号的极性相反。

在上述两种试验回路中, 保护回路应组合在耦合装置中, 并考虑能承受在试验期间试品可能发生故障时的击穿电流。

### 7.3 整体绕组

局部放电在绕组高压端测量可获得真实的局放信息, 它决定于星形点的紧密连接和测量设备所选的连接方法。

高压电源和局放耦合单元应分别连接至绕组两端, 以便利用绕组的阻尼效应来抑制传导来的骚扰。局放耦合单元应尽可能靠近绕组端。定子铁心正常情况下应可靠接地。

图 6 测试回路给出了对 U 相进行局部放电测量, U、V、W 为绕组高压端, X、Y、Z 为绕组的星形侧。

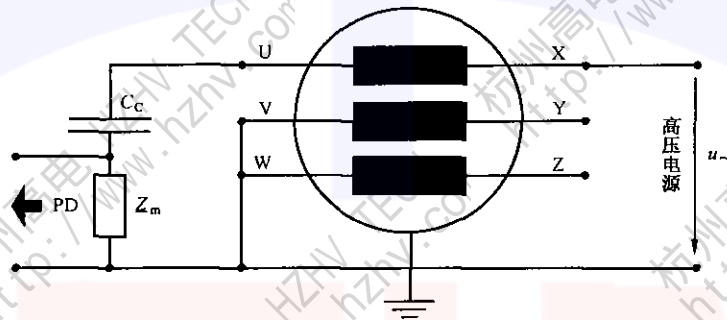


图 6 对整体绕组进行局放测量的试验回路

#### 7.3.1 推荐的标准测量

对可拆分星形点绕组的局放测量的接线方式在表 1 中给出。表 2 推荐的是可接入星形点和不可接入的星形点的测量方式。为了检查制造后的产品质量应进行局放测量, 以便对局部放电结果进行比较和趋势分析。表 1 和表 2 推荐了对新的和老化的绕组进行局放测量方法。

表 1 接线方式 S1 适用于可拆分星形点

ID 编号	名称	高压	地	C <sub>c</sub>
S1.1	U-VW	X	VW	U
S1.2	V-UW	Y	UW	V
S1.3	W-UV	Z	VU	W
S1.4	UVW	XYZ	—	UVW

表 2 接线方式 S2 适用于闭合星形点

ID 编号	名称	高压	地	C <sub>c</sub>
可接入星形点				
S2.1	VUW	XYZ	—	UVW
不可接入星形点				
S2.2	UVW	UVW	—	UVW

对可拆分星形点绕组, S1.1-S1.3 与 S1.4 的测量结果的比较, 可以检测和区分出在绕组两相之间特别的局部放电电源。例如, 由于制造缺陷或因运行导致老化的情况。

根据提供电源的容量和绕组的电容量, 对整体绕组加压可能比较困难。如是这样, 表 1 中对可拆分星形点整体绕组对地的测量可以省去。但对新绕组必须进行。例如, 对小电机, 制造后采用一个简单的测试程序, 甚至对可拆分星形点的绕组只进行 S1.4 一项。但这对绕组将来的状况比较和趋势分析只能

提供少量的信息,并且不能甄别两绕组间可能的放电。

在可以消除电源干扰的情况下,可采用 S1.1-S1.4 和 S2.1 测量方法,绕组的两个端头并接,例如,相侧和中心点侧(UX、VY、WZ)两头可以并接。对绝缘缺陷或制造缺陷,在绕组两侧测量具有相同的灵敏度。

7.3.2 可选择的补充测量(EX, X)

除 7.3.1 中表 1 和表 2 给出的标准测量方法外,另外有一些补充测量可供选择,以便对绕组绝缘的局放性质作更详细的研究。这些测量方法列在表 3 和表 4 中。如果标准测量方法表明局放源需进一步研究,在这些测量方法之外仍然可以选择其他合适的方法。无论怎样,需要进行哪一种补充测量,应由用户和制造厂协商决定。

表 3 接线方式 E1 适用于可拆分星形点

ID 编号	名称	高压	接地	C <sub>c</sub>
E1.1	X-YZ	U	YZ	X
E1.2	Y-XZ	V	XZ	Y
E1.3	Z-XY	W	XY	Z
E1.4	XYZ	UVW	—	XYZ

表 4 接线方式 E2 适用于闭合星形点

ID 编号	名称	高压	接地	C <sub>c</sub>
可接入星形点				
E2.1	U	XYZ	—	U
E2.2	V	XYZ	—	V
E2.3	W	XYZ	—	W
E2.4	XYZ	UVW	—	XYZ
不可接入星形点				
E2.5	U	V	—	U
E2.6	V	W	—	V
E2.7	W	U	—	W

由于局放脉冲沿绕组传播会衰减,局放试验可以利用该特点,采用表 3 和表 4 所列的补充测量方法作为 7.3.1 中表 1 和表 2 标准测量方法的补充,在定子绕组系统内得到更多详细的有关主要局放源的详尽位置。

8 标准化测量

8.1 总则

4.3 提及的在电机绕组中由于脉冲传播、谐振和相互交叉耦合的影响,校正是不容易的。标准化的目的就是排除测试回路的各种影响。例如,电源的连接、杂散电容、耦合电容和试品电容,当电机与测试回路连接好后,在绕组端注入一个标准的参考脉冲。标准化是保证局放测量系统能提供足够的灵敏度,以测量到一个真正的局放量的准确值。另外测试回路的标准化对使用相同局放设备并对具有相同电机结构的试品的测量结构进行相互比较。测试回路的标准化应采用标准脉冲发生器(校正器)注入已知量的短时电流脉冲来校正测量所得的读数,校准器应符合 GB/T 7354—2003 的规定。

以下两点必须重申:

- a) 标准化不能确定绕组绝缘中某个部位的实际局放,在绕组绝缘系统中实际的局放源与放置的传

感器之间信号传递函数是由电机结构本身所决定的,它只是局放源位置同绕组结构的一个函数。

- b) 电机端子上的标准化并不能真正代表定子绕组内某部位实际发生的局放脉冲。一般,对整体绕组的标准化测量并不需要提供对绝缘系统绝对的测量值。

校正的目的是为了验证局部放电测量系统能够正确地测量规定的局放值。完整试验回路的测量系统校正应按照 8.2 和 8.3 来进行,用以确定视在电荷测量的刻度因数,即确定试品和试验回路电容量的比值。当用 mV 或 mA 测量局放量时,试验回路会影响到试验结果。通常的校正方法是,校准器应符合 GB/T 7354—2003 的要求。

有必要强调,第 4 章中所提及到的电机绕组中脉冲传播现象和每种定子绕组的设计的特征频率响应有关,在高频测量系统中,整体绕组的校正并不能准确反映定子绕组中的实际放电量。但在低频测量系统中,这种校正的误差往往是可以接受的。对单个绕组元件不需考虑脉冲传播现象,可使用视在电荷的校正作为不同试品间绝对比较的基准。

### 8.2 单个绕组部件

对单个绕组部件的局放测试回路见 7.2,标准化应根据 GB/T 7354—2003(第 5 章、图 4)对整个试验回路注入一个规定的脉冲量进行校正,并进行随后的局放测量。在试品绕组两端使用标准脉冲发生器进行校正,高压电源应连接到测试回路,但不加电压。

校正应在一个合适的范围内进行,以保证局放测量的精度。对单个绕组部件,局部放电量的测量根据 GB/T 7354—2003 推荐用视在放电量  $q$  以 pC 表示。

### 8.3 整体绕组

对整体绕组,标准化测试回路根据 7.3 要求在电机端或 PD 耦合单元位置采用标准脉冲发生器注入一个规定的局放量的电流脉冲。这是模拟在测量时在电机端部出现的局放脉冲。应该注意,使用 pC 或 mV 测量对不同的电机不能提供一个直接比较的基准值。

在开始局放测试前,原则上需对 7.3 中的每个测试回路进行标准化。如果局放试验按顺序进行,例如: S1.1、S1.2、S1.3。可以利用三相绕组的对称性,只需对这些测量进行最初的标准化。

试验时根据单个电机的尺寸可以对每相分别进行标准化。对大型电机由于短路环连接的影响,三相具有对称可以不需要考虑。

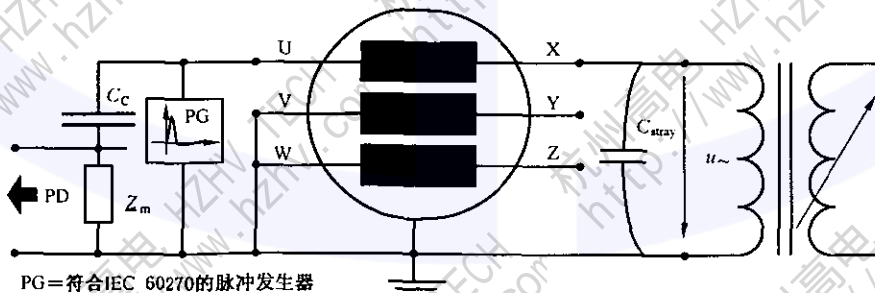


图 7 方法 S1.1 测试回路的标准化

对整体绕组的标准化程序应按照图 7 进行下列步骤:

- 按 7.3 要求测试回路的选择应根据测量的类型决定(见表 1~表 4)。
- 所有连接至高压端、局放耦合装置和测试电源的连接导线应尽可能的短,测试回路的所有元件应合理安排并与测试电源连接,但不加压。
- 标准脉冲发生器连接至相对地的两端,由于引线存在电感,为避免信号干扰引线应尽可能短。如有可能,标准脉冲发生器应直接接到高压端上。
- 脉冲发生器应根据试品的测量范围合理调节至一个合适的脉冲值。
- 通过 PD 装置标定标准脉冲的大小,为局放测量确定一个刻度系数。

从一个系统的观点看,由于整个试品的布置,连接电缆和测量装置需要滤波和放大,整个定子绕组



作为一个独立的测试回路的校正仅适用于被试的电机和检测系统。有必要重申,如果新的试验回路与前面的测量回路改变时必须重新校正,即使对称绕组也不例外。

原则上,可以采用许多混合校正程序,对在绕组中脉冲传播的交叉影响和脉冲阻尼获得有用信息。然而,这些程序不在本标准考虑范围内。

## 9 试验程序

### 9.1 绕组及绕组部件的局放测量

#### 9.1.1 总则

离线局放测量可以在整体绕组、一相绕组或者单个绕组部件上进行。对整体绕组或者部分绕组测量,试品必须与所有的外部电源、母线、避雷器和励磁系统断开。一般情况下,试验引线应接在电机端子上。在任何情况下都不允许通过断路器接入。随后所有的试验,试验接线(依照第7章包括所有部件)应该与初始测量的方法相同布置,以确保测量结果可比性。此外,为了使测量结果可比(例如进行趋势分析),应依照第5章的要求,使用相同的测量系统以及依照第8章实施的标准化过程。另外,应依照第11章在试验报告中详细记录试验实际情况。

#### 9.1.2 试验设备和安全

按第7章的要求,在试验电压范围内,试验电源应是完全无局放的。施加电压的波形应该符合  $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2} \pm 5\%$ 。电源的容量(kVA)应足够大。如果电源容量不够,可以采用感性补偿与试验电源并联或者串联,作为一种可替代方案。局放试验可以在低频率下进行(例如使用0.1 Hz的加压设备),或者在采用谐振试验系统时使用更高频率至400 Hz的供电设备。在这种情况下,应该注意从超低频试验中获得的局放结果可能与工频下的结果存在显著不同,因此无法进行直接比较<sup>[3]</sup>。不论选择何种方法,其随后进行的试验都应该使用相同的电源,以便对在一段时间内的试验结果进行趋势分析。

高压局放试验的安全要求应包含下列内容(但不局限于此):

- 试验回路必须配备可靠的过流保护装置,在发生故障或闪络时及时与电源断开。
- 定子绕组端子与高压的连线应尽可能短,并且必须有安全加固装置以避免在试验期间连线松开。另应配备接地棒。
- 试品周围的区域应该用遮栏隔离,并悬挂标示牌。
- 试验接线和加压的过程中,至少应有两人在场。

应遵守所有相关的安全的条例和规则,特别是对试验设备的。

#### 9.1.3 试品的准备

试验开始前,应仔细检查定子的清洁情况。对相邻相的连接间距、绕组内部导线间间距应足够。导线不应互相碰触,或碰触不同电位的任何表面。

为了确保绕组绝缘具有足够的绝缘强度,建议在局放试验开始前检查绝缘电阻,通常绝缘电阻在校正到40℃时要求在100 MΩ以上<sup>[4]</sup>。测量绝缘电阻有助于发现绕组是否受到严重的污染、受潮或者绝缘受损。如果绝缘电阻不符合要求,建议对绕组进行清洁并干燥或在确定绝缘电阻偏低的原因后,再进行试验。但是,根据试验方和用户间的协议,电机也可以不需进一步处理就进行局放试验。

在施加高压之前,单个的绕组部件(例如线圈、线棒或浸渍定子的绕组部件)应该仔细检查。进行清洁和干燥并采取防晕措施。应尽可能避免部件端部的电场集中,所有股线应接触良好。导电防晕层应在其全长范围内与地电位紧密接触以形成一个等电位表面。推荐采用细的软铜线、铜绞线或者合适的槽模型。

#### 9.1.4 预处理

在施加电压后的最初几分钟,局放将出现明显地减弱,而预处理将确保绕组或绕组部件的局放测量更准确的。因此,在读取局放值前,应预先加压几分钟对试品进行预处理。为了防止绕组过电压,施加电压应该根据绕组状态慎重地选择。对于新的和老化的绕组,推荐在最大试验电压下(见9.1.5)预处

理 5 min。预处理对于单个绕组部件也适用的。在预处理之后,可以重新施加试验电压开始进行局部放电测量。

### 9.1.5 试验电压

对于局放试验,根据第 7 章将试品接至试验回路,加压程序既可以采用阶跃式的(例如  $\Delta U = 0.2 U_N$ ),也可以是持续的( $\leq 1 \text{ kV/s}$ )(见图 8b)。升至最高试验电压  $U_{\max}$ 。如果按照图 8a)阶跃式地增加电压,建议每步至少保持 10 s。以便记录相应的局放参数及在每步电压下的局放模式。在持续升压情况下,电压调节要求电源是完全无局放的。新绕组和绕组部件的最大试验电压  $U_{\max}$ 可以从下列电压水平中选取:

$U_1 = U_N/\sqrt{3}$ ,或者绝缘系统的运行电压(线对地);

$U_2 = 1.2 U_N/\sqrt{3}$ ,或者 120% 的绝缘系统运行电压(线对地);

$U_3 = U_N$ ,或者绝缘系统的额定线对线电压。

对于老化绕组,试验方和用户之间应该就升压速率和最大试验电压达成一致意见。

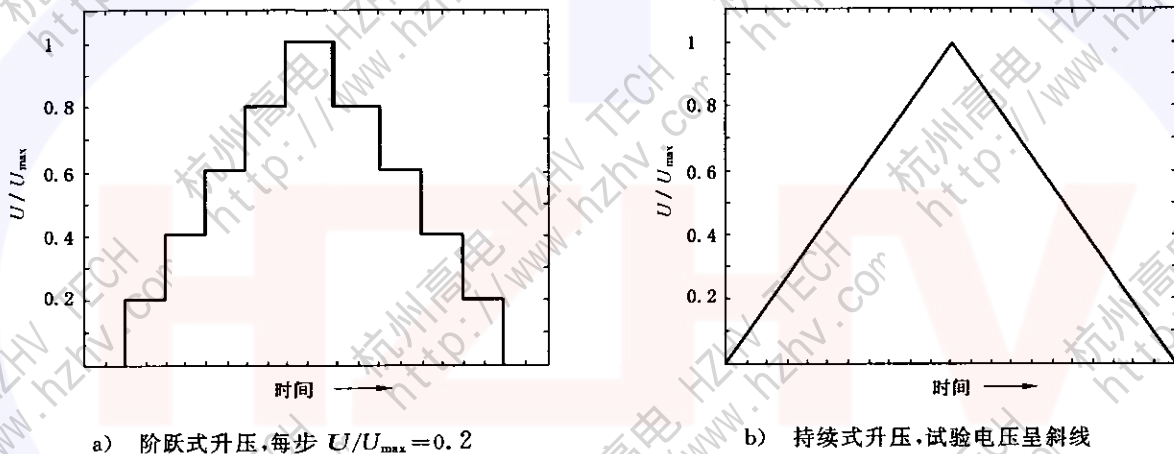


图 8 试验电压

### 9.1.6 局部放电试验程序

#### 9.1.6.1 背景噪声测量

局放试验前,应测试与测量装置相关的背景噪声水平,以确保试验装置在升至最高试验电压时具有足够低的噪声和局放。背景噪声测量应该在局放测量回路准备好后进行,若用一个无局放电容器作试品则更佳。如果没有,则空载运行全部试验装置(即接入电源、局放耦合单元和局放测量装置,只断开试品)并升至最高试验电压。在空载试验情况下,应按空载状态分别标准化试验回路,以获得准确可靠的局放数值。如果随后的试验采用持续升压,空载试验应以相同的速率加压。

#### 9.1.6.2 减少噪声和骚扰的影响

噪声(由测量装置内部固有的源所引起)实际上不能完全消除,例如热噪声(见附录 D, 噪声、骚扰和灵敏度)。而骚扰(假定其来自于外部元件)能通过合适的方法使之减小或者消除。消除骚扰的方法首先进行定位并采用合适的方法使其最小。通常,下列方法可以改善和优化测量装置:

- 使用校验过的局放耦合单元与测量设备的整套装置。
- 耦合单元尽可能靠近试品,以减小试品与耦合单元之间的信号衰减。
- 将电源和局放耦合单元分别连接到绕组的两端(见第 7 章),以抑制来自电源的骚扰。
- 测试整个定子绕组时,所有埋置式温度传感器(RTDs)的导线应良好接地。
- 分别测试传感器和局放耦合单元的局放,以确定骚扰量值的大小。
- 建议在每次测量前进行试验装置的标准化测量。因为测量的位置和时间不同,供电网的电源质量问题,变压器表面的脏污和变压器绝缘可能的老化或者其他的问题等都可能影响到局放

测量。

- g) 试品和测量设备的接地要求良好(采用大面积的导线接地)。局放耦合单元、试品和测量设备应一点接地。
- h) 试验装置布置应紧凑。测量电缆、接地线和回路连线尽可能短,以尽可能减小试验的电磁耦合。
- i) 测量电缆阻抗应匹配以避免反射。
- j) 某些电子装置(例如计算机和监视器),可能会对测量设备产生干扰。通常,适当调节这些装置的放置和方向可以减小对局放测量的影响。

### 9.1.6.3 局部放电试验

局部放电试验测量回路按第 7 章建立,试验电压按 9.1.5 要求施加。在每个电压等级或持续升压过程,推荐按第 6 章进行局放数据的记录并处理,以获得合适的局放数据表达方式。依照第 6 章,需测量  $Q=f(U)$  曲线以及局放起始电压(PDIV)和熄灭电压(PDEV),加压方式应按图 8 所示的先增加随后减小的加压方式进行。在电压的增加和减小期间,应采用同样的速率。

如果局放测量采用数字局放仪记录,则可以获得第 6 章中推荐的图表,它包括在试验电压增加或减小过程中各个电压水平下的脉冲幅值分布、相位离散分布或特定的局放模式(见第 6 章和第 10 章)。并按第 10 章内容对测量的局放结果进行评价。

试验期间,应记录下观测到任何现象或异常,以便将来查阅。根据测试电机要求和试验目的不同,按照第 7 章中的规定的测量项目或辅助测量项目进行适当的补充。

## 9.2 局放源的辨识和定位

### 9.2.1 总则

使用的仪器能具有 6.3 所要求的局放参数功能时,对试品端子的局放测量能评价试品放电的强度、频率和极性。但重要的是将这些参数转化为关于绕组状态的有用信息,辨识出局部放电源的位置。

一般局部放电试验逐相进行,另外两相接地。这为每相绕组提供了一个典型的局放分布或局放模式。每相试验之后,若电源容量(kVA)足够大,在离线条件下,放电起因的最好和最基本的测定方法是给全部三相绕组同时加压。如果三相绕组同时加压,可消除绕组端部相与相之间电压梯度的影响。去除局放信号中有关绕组端部相与相之间的放电,可以明确地显示相对地的放电,有助于分析其放电性质。若局放量和脉冲数相应减小,则表明绕组端部局放在单相试验测量中起作用。这是将绕组端部局放和槽中放电区分的有用方法。

为了寻找和定位一个特定的放电源,如有可能,最好将绕组拆分进行诊断。但由于电机制造特点,极间连线、短路环和导线从一相接至另一相,因此这些元件是彼此连通的,在这种情况下,一个回路接地而另一个加压,可能会出现异常情况并记录到较高的局放水平。在这种情况下有必要拆分绕组。用户和试验方在试验前应向电机制造商咨询以得到技术指导。

根据局部放电的不同物理效应,可补充多种辅助试验方法。为了确认绕组端部是否存在放电,在试验期间,使用能够观察电晕放电的仪器或相机从两端检测绕组。如有必要,可将外壳和转子抽出进行这种观察,这是离线试验的一个优点。

下面介绍常规的有关电气定位法。非电量局放源定位方法将在附录 B 中阐述。

### 9.2.2 电磁探头

使用电磁探头进行局放源定位,需要在不同的外施电压下对定子槽部(在抽出转子后)、槽出口区域或绕组端部区域进行检测。除了在  $U_1$  下进行检测外,还要求在电压小于  $U_1$  的几个电压等级上进行类似的检测。特别是与同类型测试过的电机的数据库中的数据作对比,使用此类型探头是最佳的。

应当注意,局放活动不可能仅局限于电机绕组端部。导线接头盒、电缆、端子板和支柱绝缘子等也会产生局放,故对它们也应进行检测。另外需注意的是,探头会干扰电磁场,可能感应出虚假的放电。对于用这些探头在绕组端部进行的局放检测,试验人员需要考虑特殊的安全措施。



## 10 试验结果的评价

### 10.1 总则

通常,绕组及绕组部件工厂局放试验的目的是保证电机的制造质量,而现场局放试验的目的则是评定电机绕组在运行期间受不同的应力因素的作用而老化的程度。因此,对试验结果的评价是局放测量后最终的也是最重要的一步。根据试验结果,判断绝缘是否有缺陷。如果有缺陷,对整个绝缘系统的运行来说,决定是否需要辅助试验,是否需要计划或执行彻底的恢复性维修。

应注意的是,单个电机在运行期间通常要承受特定的应力层,而不同的制造厂的设计特点有很大不同、生产条件差异和绝缘系统种类繁多。这通常会引起局部放电量的明显的变化,它取决于被试电机的特有的特性。因此,不同类型的电机不推荐进行绝对值的直接比较。但为了控制和保证电机的制造质量,可采用视在放电电量作为评价同类型电机定子绕组质量的标准(评价标准详见附录 A)。

为了完善对整个定子绕组局放试验数据的评价,应该从状态评估角度仔细分析和考虑以前的检查报告,例如外观检查的结果。

### 10.2 PDIV、PDEV 和 Q 的评价

#### 10.2.1 基本解释评价

对离线局放测量结果进行评判,应根据 6.2,在升压和降压时测量局放起始电压(PDIV)、局放熄灭电压(PDEV)和重复出现的最大局放量(Q)。

检测到最大局放量不一定是绕组中最危险的部位,但可以将检测的局放量看作为试验电压的函数,它是一种描述局放源特征的简单而有效的方法。

对整个定子绕组而言,评价总是相对的。也就是,通常不可能确定 Q 值的可接受水平或者存在严重绝缘隐患的 Q 值水平。正如第 8 章中所述,这与定子绕组的电感、电容和传输线特性有关,也与局放值仅仅是失效过程的表征而不是直接原因这一事实相关。然而,可通过下述方法对定子绕组进行评判:

- 使用相同的测试方法和相同的技术参数的测试设备,在同一个定子上测量 Q 值在一段时间上的趋势;
- 使用相同的测试方法和相同的技术参数的测试设备,对几台具有相同结构的定子的 Q 值进行比较;
- 使用相同的测试方法和相同的技术参数的测试设备。对同一台定子的三相 Q 值进行比较。

单个线圈或线棒的局放测量结果用绝对局放量 pC 表示。对不同线圈或线棒的局放量允许进行比较,也允许对使用不同的测试设备测量结果进行比较。单个绕组部件的起始放电电压(PDIV)和熄灭放电电压(PDEV)的测量应在允许的最大噪声背景(pC)下测得。

通常,对相同类型的电机而言,PDIV 和 PDEV 越高,则表示绕组或绕组部件绝缘浸渍得越好,绝缘缺陷越少。

#### 10.2.2 电机中局放随时间的变化趋势

不论采用哪种检测方法,对评价整个定子绕组局放数据都是有用的。首先必须获得一个离线局放活动的初始指纹,新绕组的初始指纹最好。如果电机绕组由于运行服役而劣化,则 Q 值通常将随时间而增大。例如,Q 值在一年内翻倍可能是明显的劣化已经发生的一个迹象,则可以通过进行辅助的离线试验、局放定位测试或者绕组外观检查确定。

有关局放随时间变化趋势的一些应注意点:

- 新的电机定子绕组局放值可能较高,但经过第一个(5 000~10 000) h 运行之后会逐步减小,原因是绝缘完成了自愈过程。另外,定子槽内的线棒或线圈的导电涂层和接地的定子铁心之间的电气接触得到了改善。
- 为了使趋势分析有意义,趋势图显示的数据只采用在相同电压、温度和相似的湿度使用相同的局放检测仪条件下检测到的数据。在不同试验期间,试验电压变化不应超过 $\pm 2.5\%$ ,试品

温度变化不应超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。对于氢冷电机,推荐在大气条件下进行测量,但是在任何情况下都必须与以前试验相同的气体条件和压力条件下进行。

- c) 由于试验条件不可避免地会出现变化,并且局放测量过程或多或少具有统计特点。因此,Q值变化百分之几(例如 $\pm 25\%$ )属正常的。

如果局放随时间变化趋势上升,或者单个读数与类似定子绕组或线圈相比较,则需对局放数据进一步分析以确定局放活动增强的可能原因。依照 10.3 的相位离散局放模式分析方法(图 4)对该种情况的局放源辨识是有帮助的。

### 10.2.3 绕组部件间或绕组间的比较

为了确定一个绕组或绕组部件与其他是否存在异常,一种有效方法就是对绕组部件间或绕组间的局放量进行比较。下列情况可以进行比较。

- a) 绕组部件的工厂试验:按照 GB/T 7354—2003 的要求进行测量,对 PDIV、PDEV 和 Q 可以进行直接比较,与部件结构或测量装置无关。根据试验的结果,判别在绕组部件中或绝缘材料中是否发生了变化。通常只需一小部分的绕组部件进行了局放试验。
- b) 绕组的工厂试验:对同类电机局放结果进行比较,最有效的是对定子结构相同(包括具有相同的绝缘系统),试验条件相同(试验电压相同、温度和湿度条件相似)下测得结果进行比较。试验要求使用相同局放试验设备,且测量设备使用频率范围相同。至于随时间的变化趋势(10.2.2),不同电机的 Q 值变化在百分之几(例如 $\pm 25\%$ )并不算严重。工厂中进行这些比较试验的目的是确定制造绕组的材料和工艺的质量。用户可以要求制造商保证新绕组制造质量不低于现已达到质量水平。也就是说,在商定的试验电压下的绕组 Q 值要低于制造商过去制造的相同绕组 Q 值的 95%。

在某些情况下,制造商可以将一个新绕组的局放量与它们过去曾制造的类似绕组相比较。在这种情况下,制造商应该根据经验,对一组不同的电机设计结构应具有相同的局放值统计分布。通常,类似的电机具有相同的设计,属于同类型的电机(如电动机、涡轮发电机等等)并且具有相同的电压额定值。

由于工艺和材料的差异,以及局放试验方法可能存在的差异,因此,不建议对不同的绕组绝缘结构系统或者不同的制造商的整体绕组进行局放量的比较。

- c) 绕组在线测试:对具有相同设计结构、制造商和电压值的电机绕组之间进行比较,以便判别哪一个绕组可能出现了最严重的运行老化。在相同的试验电压下,Q 值较高或者 PDIV 和 PDEV 较低的绕组,通常老化更严重。绕组局放试验必须使用相同的试验设备且频率范围相同。

### 10.3 局放模式识别

记录每次测量的局放数据,可依照 6.3.2 采用  $\phi-q-n$  模式(图 4)用于评价离线测量的局放行为。由于劣化的程度和绝缘失效的危险与特殊类型的局部放电密切相关,因此收集关于局放源活动(即放电类型和在定子绕组或绕组部件内的可能位置)的声音信息是非常重要的。

使用  $\phi-q-n$  模式,能将各种局放源彼此区分开,并分别判别其危险性及发展趋势。由于局放量与局放模式中指示的老化过程之间的相关性非常小,所以必须区分放电源。在了解其后的变化过程或者这些单独局放源的位置,就可能分别判别它们的危险。

例如,可能出现两个子模式(在同一次局放读数中)得到相近的局放量的情况:一个是由于槽部主绝缘内部分层引起的,另一个是在绕组端部某处的表面效应引起。尽管两种现象可能产生了等值的局放,但槽部的分层局部放电(由于过热或热循环引起)比绕组端部的表面局部放电(由于污染或者潮湿引起)的危险性更大。

#### 10.3.1 基本评价

使用相位离散局放模式,可按图 9 流程图的基本步骤对绕组中的典型局放源进行辨识和定位。对

能从整个局放读数中区分出来的每个子模式都能够用这种方法进行分类。

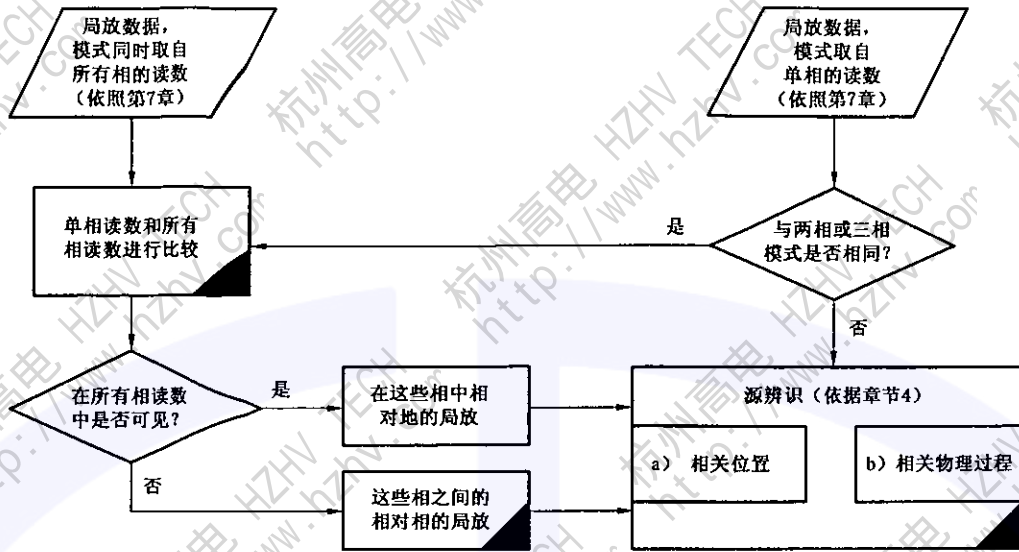


图 9 局放源辨识和定位的示例

辨识局放模式的目的是对取自试品内各种局放源的局放结果进行区分,并掌握这些信息(见附录 F):

- a) 观察每个局放源的趋势特征;
- b) 对各种局放现象进行辨识;
- c) 提供有关精确定位的初步信息;
- d) 根据局放源和局放位置,评价绝缘状况。

在分析相位离散的局放模式时,仍然可以通过下列方法得到最有价值的评价:

- a) 使用相同的测试方法和技术参数相同的设备,积累同一个定子的局放模式随时间的变化趋势;
- b) 使用相同的测试方法和技术参数相同的设备,对设计结构相同的几个定子的局放模式进行比较;
- c) 使用相同的测试方法和技术参数相同的设备,对同一个定子的不同相的局放模式进行比较。

为便于试验结果间的可比性,应建立局放测量数据库。数据库应包括每台电机局放行为的全部历史记录以及运行和维护数据。此外,建议按第 6 章进行将局放试验结果可视化并收录数据库,则新测量后获得的模式能直接与典型的局放模式进行比较。若使用这样的数据库,就可将局放试验结果依照第 6 章进行量化,并归类至特定的局放源。

局放源的典型特征和其对绝缘失效风险的指示之间的特定关系,通常基于经实践证实的经验。另外,对设计结构和绝缘系统类似的电机的局放结果也可与数据库直接比较,以得到进一步的有用信息。

## 11 试验报告

试验报告应包括所有用于趋势分析所需的数据,以及给用户对电机运行情况一个明确的建议。

试验报告应包括以下参数和数据。

电机参数

制造厂

型号和出厂号

制造年月

原绕组/重绕绕组投产日期

额定电压

额定电流



额定视在功率

额定功率因数

额定频率

绝缘等级/绕组允许最高温度

绝缘系统

定子冷却系统/介质

——间接冷却介质:空气/氢气/二氧化碳

——直接冷却介质:空气/氢气/水

用户数据

用户名称

安装位置

机组号

运作数据

运行方式(连续/间断)

逆变器驱动

总的等效运行小时

总的启动次数,如果可能包括热启动、暖启动和冷启动次数

跳机次数

绕组最高运行温度和环境条件

绕组平均运行温度

重要事故情况

测试回路和装置

试验回路的描述

使用的测试设备;包括制造厂、型号、序列号、校正数据和验证次数、耦合电容器的电容量

局放测量系统的带宽

测试条件

测试人员

日期

环境温度

定子绕组温度

相对湿度

大气压力

电机的状态/定子绕组(冷却介质压力或与暴露在空气中)

测试结果

绝缘电阻

仪器的设定

测试电压/上升速率

预处理

标准化/每次连接的校正系数

噪声水平

周围的骚扰源(如知道)

PDIV、PDEV、 $Q=f(U)$

可辨识的相位放电次数分布

可辨识的相位放电幅值分布

脉冲序列示波图

可辨识的相位放电模型

诊断和建议

根据测量结果

与前次测量进行比较

测量期间观测到现象

如有可能,比对数据库,确定测量到的放电的性质

建议把测量结果作为原始数据形式储存以供将来参考。

**附录 A**  
**(规范性附录)**  
**评价标准**

由于电机绕组局部放电受电机本身机构和脉冲传播现象的影响,电机绕组的局放测量建议采用局放模式进行评价。但是,为了比较同一试品不同时期或同类型电机采用相同仪器和方法测量,可采用视在放电量作为评价电机定子绕组的标准。表 A.1、表 A.2 列出了额定电压 6 kV 及以上电机单根线棒和整体定子绕组绝缘离线试验的最大视在放电量限制值,供参考。

**表 A.1 单根线棒最大视在放电量限制值**

试验电压		局放量/pC
额定相电压	A(优级)	50
	B(一级)	100
	C(合格)	200
额定线电压		500

**表 A.2 电机整体定子绕组(或分支)最大视在放电量限制值**

试验电压		局放量/pC
额定相电压	A(优级)	3 000
	B(一级)	5 000
	C(合格)	10 000
额定线电压		20 000



## 附录 B

(资料性附录)

## 使用非电测量法进行局部放电的检测和定位

## B.1 总则

局部放电非电量检测法包括声学 and 光学的方法,另外还包括在现场对试品的任何放电效应的持续观测。

这些方法一般不适用局放的定量测量,主要用于局放的监测和定位。

## B.2 检测和定位方法

## a) 目测检查

起晕(熄灭灯火)试验,采用缓慢加交流电压,观测表面电晕并确定表面放电的位置。

## b) 光学检测

使用电晕检测仪或光电倍增器检测表面电晕位置。

## c) 声测法

在安静的环境施加交流电压:靠人耳或声波导向器进行定位。

使用适当长度(有闪络保护)绝缘的听诊器对局部放电进行定位,除非放电声特别大,一般不容易检测到主绝缘中的局部放电活动。

## d) 超声波定位

使用带适当长度(闪络保护)绝缘的超声波检测器在试验电压下,对定子槽或线棒表面(近接地部位)进行扫描。根据声源以确定放电部位。

## e) 臭氧检测

表面放电的存在会产生化学反应,化学反应后产生一种臭氧物质,它有特殊的味道。

**附录 C**  
(资料性附录)  
**局部放电在线测量**

在线局放检测是指在发电机或电动机正常运行时进行的测量。导则 IEEE 1434—2000 详细描述了关于局放的起源、结果以及在线和离线局放检测技术。测试可以使用临时或永久性安装的耦合装置。

局放在线检测的优点在于测量数据是在旋转电机承受着所有的运行应力的情况下记录到的,这些应力包括热、电、周围环境和机械的应力。因此,如果测试是完全正确进行的,该方法能有效评价电机是否具有持续可靠运行的能力。在线局放检测具有下述优点:

- a) 绕组中的电压分布正常;
- b) 在运行温度下进行测量;
- c) 承受正常的机械力。

第一减少了电机绝缘出现严重裂化的局放结果的风险,因为它提高了绕组在高电场强度区域的测量灵敏度。第二个优点也非常重要,因为在旋转电机以及其他绝缘系统中的局放具有温度依赖性。温度除了对空隙特性影响外,温度的波动对局放行为有明显的影 响,其影响机理为:

- a) 热量对铜导体和绝缘之间产生不同的轴向膨胀;
- b) 在热塑性绝缘系统中温度对绝缘的产生径向膨胀。

因此,检测应保证电机在运行条件下充分稳定后进行。然而,在有些特殊的情况下,在负荷和温度变化下进行局放试验,有助于局放数据的分析,它能区分温度和振动的不同影响,温度和振动是通过作用在绕组上的电磁力所引起的。与此相关的基本运行参数有:

- a) 端电压;
- b) 有功和无功率;
- c) 氢气压力(如有);
- d) 定子温度;
- e) 定子电流。

有关这些参数的允许偏差可参考导则 IEEE 1434—2000。在工作应力下进行局放试验的能力是在线技术相比于离线技术的主要优点。当然,如果离线试验方法被正确地运用、分析和评价,也能够提供有价值的关于绝缘状态的情况。然而,它存在一些不确定的情况,因为温度通常是明显不同的,而且线棒没有电磁力作用。鉴于此,离线局放试验往往不能确定绕组是否松动,除非由线圈/线棒表面和铁芯之间的相对运动导致的半导体护层磨损非常严重。

然而,在线局放测量技术也存在一些不利条件,如:

- a) 电磁干扰;
- b) 数据容量;
- c) 评价。

第一个不利条件是电子噪音问题,该问题在别处已有详细讨论,此处不再叙述。对监测电机数量众多,甚至在某些情况下试验周期是几个月,对制造厂和用户而言,测试数据的容量就成了问题。在使用连续的在线检测技术时,这个问题就显得更加突出。一个简单的方法就是采用数据压缩或者报警处理功能,它可通过特定的局放数据趋势程序实现,对那些偏离正常值的局放进行进一步观察。原则上,可采用人工神经网络和专家系统等技术完成该工作。但目前就局放起因、机理和影响的理解和掌握,还难以全面定义这种自动化分析所必须的条件判断。显然,如期望得到一个可靠的系统,需对这个领域作进一步的研究工作。

附录 D

(资料性附录)

外部噪声、骚扰和灵敏度

D.1 概述

噪声定义为任何不应有而出现的电信号。局放测量需区分噪声为测量仪器的内部噪声还是来自外界骚扰的噪声。来自恒定波信号或者脉冲干扰信号的外界骚扰表现为传导信号或者辐射信号。因此，灵敏度、噪声和骚扰之间有密切的内在联系。如果考虑其中一个因素而不考虑另外的两个因素是不现实的。在现场或在工厂进行离线试验一般都使用测量装置，下列内容将局限于这些基本问题讨论以及如何处理。

D.1.1 灵敏度

局放测量装置的灵敏度可以基本定义为，在局放位置的实际局放能量与局放检测器检测到的能量之比。

在局放发生的瞬间，整个试验装置及电容器(包括变压器  $i_{PDt}$ ，电源线  $i_{PDl}$ ，局放耦合单元  $i_{PDc}$  和试品  $i_{PDs}$ )对这个局放部位进行再充电。显然，所有这些电流分量之和等于局放部位的总电流：

$$i_{PD} = i_{PDt} + i_{PDl} + i_{PDs} + i_{PDc}$$

比率  $i_{PDc} / (i_{PDt} + i_{PDl} + i_{PDs})$ ，即耦合电容器的电荷转移，反映了测量的灵敏度。局放耦合单元的电容越大，即耦合电容与试品电容的比率越大，则测量的灵敏度就越高。

如果自由选择耦合电容器，则电容量大的耦合电容器灵敏度较高。当然，耦合电容器还需满足测量装置的带通特性和测量阻抗  $Z_m$  要求。

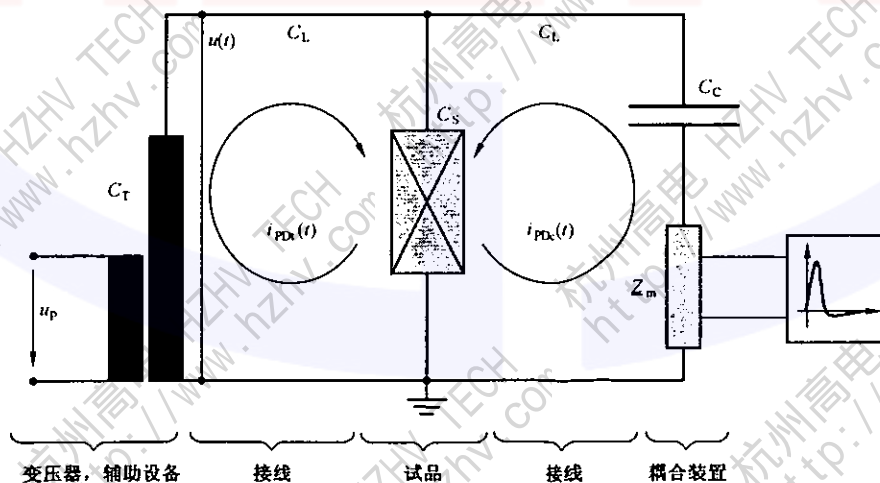


图 D.1 多个电流分量对试品的再充电

D.1.2 噪声和信噪比

电子系统中的全部噪声可分为两种截然不同的类型：基础噪声和附加噪声。基础噪声是由电路中离散电荷的运动引起的，无法完全消除。附加噪声来是由带缺陷的仪器设备或者非理想的元器件特性引起，原则上可以减少至可忽略的水平。这两种类型的噪声，基本上都与频率无关。由于附加噪声主要受仪器设计的影响，测量人员无法改变和抑制它，因此在此不进行讨论。

基础噪声主要是热噪声(Johnson 噪声)，它由离散电荷的热运动产生。电荷携带者的热波动在电阻两端引起电压降，表现为穿过这些元器件的热噪声。显然，噪声水平随温度升高(热运动越快)和电阻



增大(电压降越大)而增大。

所有遵从 GB/T 7354—2003 的局放测量系统都按照准积分滤波器的原理工作,测量装置的带宽对信号和噪声具有相同的特性:带宽越宽,检测到的信号能量越多。因此这种积分器的输出信号将随着带宽增加而增加,使所需的局放输出信号更大,噪声信号也更大。但与所需的局放信号的幅频谱特性相比,局放信号在非常高的频率范围内它基本是不变的,而热噪声频谱则随频率增加而减小。对局放脉冲而言,带通滤波器的输出信号与带宽成正比。对热噪声而言,它与带宽的平方根成正比。因此信噪比 SNR 近似地随带宽平方根而增大——带宽越宽,SNR 越高。

对一个具有固定阻值的局放耦合器上述关系是成立。由此也决定了低截止频率,对某个特定的布置是有效的。为了降低低截止频率,必须增加耦合电容。耦合电容越大使通过传感器的电流更大,输出信号也更大。在低频范围工作的窄带装置具有与在高频范围工作的宽带装置具有相同的 SNR。由耦合电容器、耦合阻抗和测量装置构成的测量系统必须相互匹配的。

#### D.1.3 骚扰

骚扰和噪声可通过它们的特性加以区分。噪声是偶然或者周期出现,并且来自外界源,例如整流器、电压跌落或附近的高压电晕。安装离线测量系统必须进行一些测量来减少这些骚扰的不利影响。对离线测量而言,这些外界信号中的部分信号比在线测量要弱。如何减少这些外界骚扰信号影响基本原则已在 9.1.6.2 中给出。

附录 E  
(资料性附录)  
噪声抑制方法

E.1 频率限制范围

对局放脉冲而言,外界骚扰(骚扰噪声)的频谱不是连续频谱(见 5.3 图 1)。骚扰更类似于电力输电线频率或者外界设备开关频率(例如励磁设备)的奇次谐波(见图 E.1)。

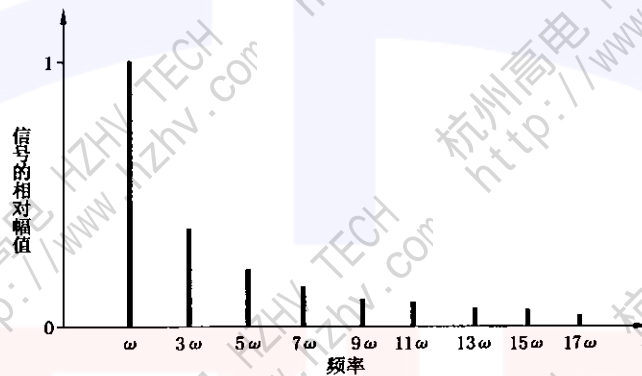


图 E.1 奇次谐波

这些骚扰的另一个来源是 HF 发射机和其他 HF 发射源的边缘频率。

为了减少这些骚扰对测量电路的影响,可使用带宽 9 kHz~30 kHz 的窄带系统(见 5.4)。当改变最大骚扰之间的中心频率时,会显著减少骚扰影响。测量装置可以与试验布置合理匹配使用。

E.2 相位窗遮蔽法

相位稳定的骚扰可以通过衰减进行消除。这可以通过预制相位窗内的测量通道电子失效来实现。由于来自试品的骚扰和局放都被遮蔽了,数据不可避免受到影响。见图 E.2 和图 E.3。

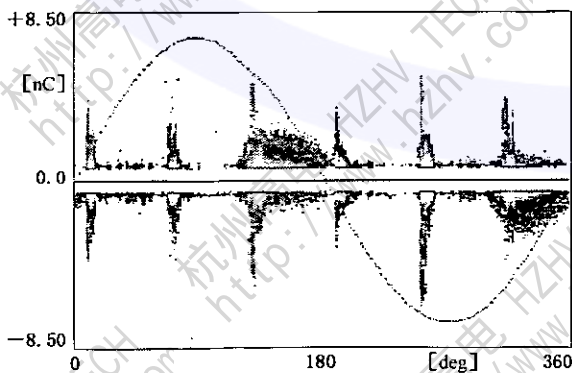


图 E.2 没有相位窗遮蔽

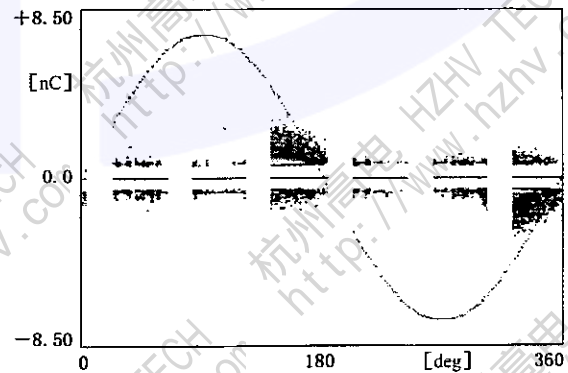


图 E.3 有相位窗遮蔽

E.3 噪声信号触发遮蔽

局放测量装置至少应配备两个输入通道:除了测量通道外还有第二个测量通道。如果这个第二通道接收到一个信号,测量通道将在该时间间隔内关闭。因此,选通通道的局放传感器完全接收骚扰源。

E.4 通过测量传播时间来检测噪声信号

局放信号通过试品和电缆以波的形式传播。局放脉冲到达试品和电缆内不同位置的时间不同。在不同的位置安装两个局放耦合器,就能确定脉冲的方向。外部局放信号和外部骚扰信号就能与来自试品的局放信号区分开。如果外部骚扰信号交叉耦合至试品,就可能将他们作为试品的局放处理。

E.5 双通道信号差分法

外部信号和绝缘中局放都通过试品和局放耦合装置传播,因此在试品和局放耦合装置上都能测量到它们(见图 E.4)。

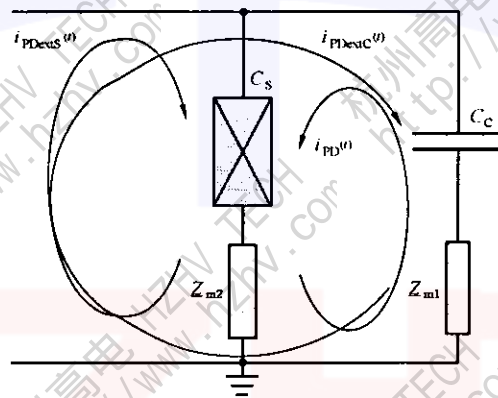


图 E.4 通过测量装置的脉冲电流

对外界信号源而言,通过两个测量阻抗的电压降,具有相同的极性;对来自试品自身的局放而言,具有相反的极性。有两种可选的方式将测量装置接至低压耦合装置(测量阻抗):

第一种方法是用双通道的测量装置,每个通道对应一个耦合装置,单独测量电压下降。然后用极性信号削弱外部信号。

第二种方法是在测量阻抗的前面相连之间接入测量装置。假定测量阻抗相同并且通过两个电路没有相位偏移,则对外部信号或骚扰而言,测量到的电压差接近 0;对来自试品的局放而言,电压差为 2 倍。

E.6 用数字滤波器抑制等幅波(CW)

抑制等幅波噪声的有效方法是采用高阶数字滤波器,它能对不同频段的等幅波噪声进行削弱。这些滤波器是依靠数字局放测量装置中的信号处理算法得以实现。与窄带局放测量系统(见 E.1)的频带限制相比,数字滤波的优点是能够从绕组中检测到更多的局放能量信号成分,因此信噪比更高。此外,脉冲的极性信息也将保留下来。

为了消除干扰信号,必须知道干扰信号的频率。因此,该方法需对检测到的信号进行频域分析。在频域内通过对环境噪声的分析确定滤波器系数,以检测和对加权噪声频率范围作进一步衰减。因此,数字滤波器的优化设计取决于局放试验的特定环境。

在实际的局放测量期间,检测到的信号按照典型的滤波器特性进行处理。

E.7 用信号处理技术抑制噪声

电厂内的脉冲噪声来源有几种,例如电晕放电(试品外的局放)、励磁机中的电力电子设备发出的脉冲。



通过对脉冲波形的数字化分析可实现对噪声脉冲的抑制。实际上,局放和噪声脉冲的波形通常是不同的,而且频谱也不同。脉冲源与检测器输入之间的传输阻抗和噪声源的性质不同。例如,励磁机产生的脉冲通常比绝缘系统中产生的局放脉冲具有更低的频率分量。

抑制噪声方法需捕获每个单独局放事件的脉冲波形的合适硬件(比如,提供足够的带宽、采样率和捕获内存,能够获得基于触发条件的脉冲和短的停顿时间)以及合适的软件工具。为了减少连续噪声的叠加影响,采用合适的滤波器绘制出检测器的频率响应曲线。

根据一些特征参数(例如带宽、脉冲形状、衰减特性等)将每个记录的脉冲加以分类,就能区分试品中的局放和噪声脉冲,也能把每个单独的脉冲归类到确定类型或部位的局放源。这样的分类也可有效地用于单独分析每个检测到的局放源,例如用于趋势分析和评价。

区分局放脉冲和噪声脉冲的一般程序如下(供参考):

- a) 记录足够数量的脉冲;
- b) 从每个记录的脉冲中,提取一些能够区分局放和噪声脉冲间差异的特征;
- c) 将具有类似特征的脉冲分组归类;
- d) 对每组脉冲相位可辨识的局放模式进行评价;
- e) 去除那些会引起相位可辨识的局放脉冲与噪声相混淆的脉冲。这个程序可以自动进行或基于操作人员的经验。

在图 E.5 和图 E.6 中,给出了依据等价时间长度  $T$  和带宽  $W$  进行脉冲分类的两个例子。这些参数的定义可以参考电信理论的标准教科书。

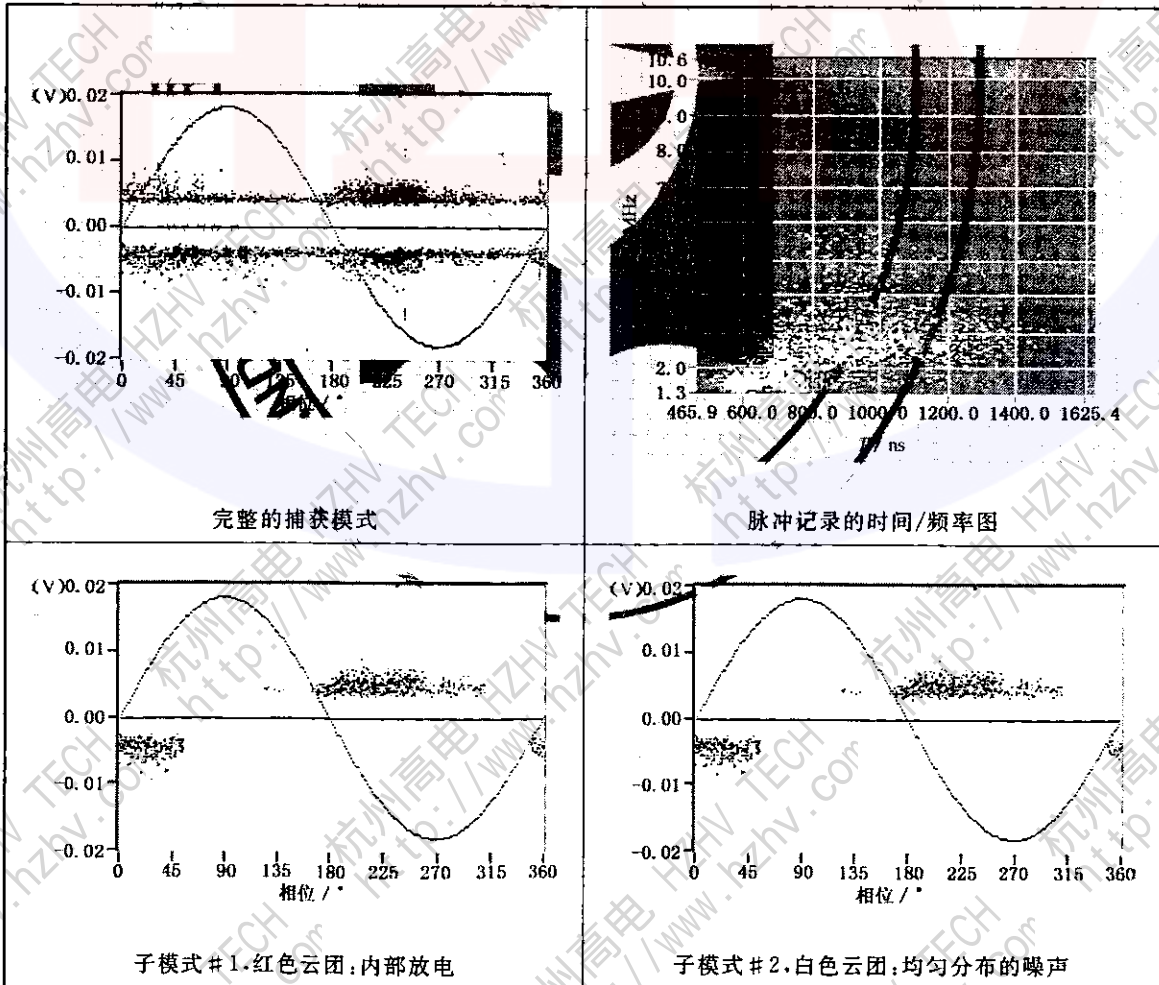


图 E.5 噪声抑制的例子

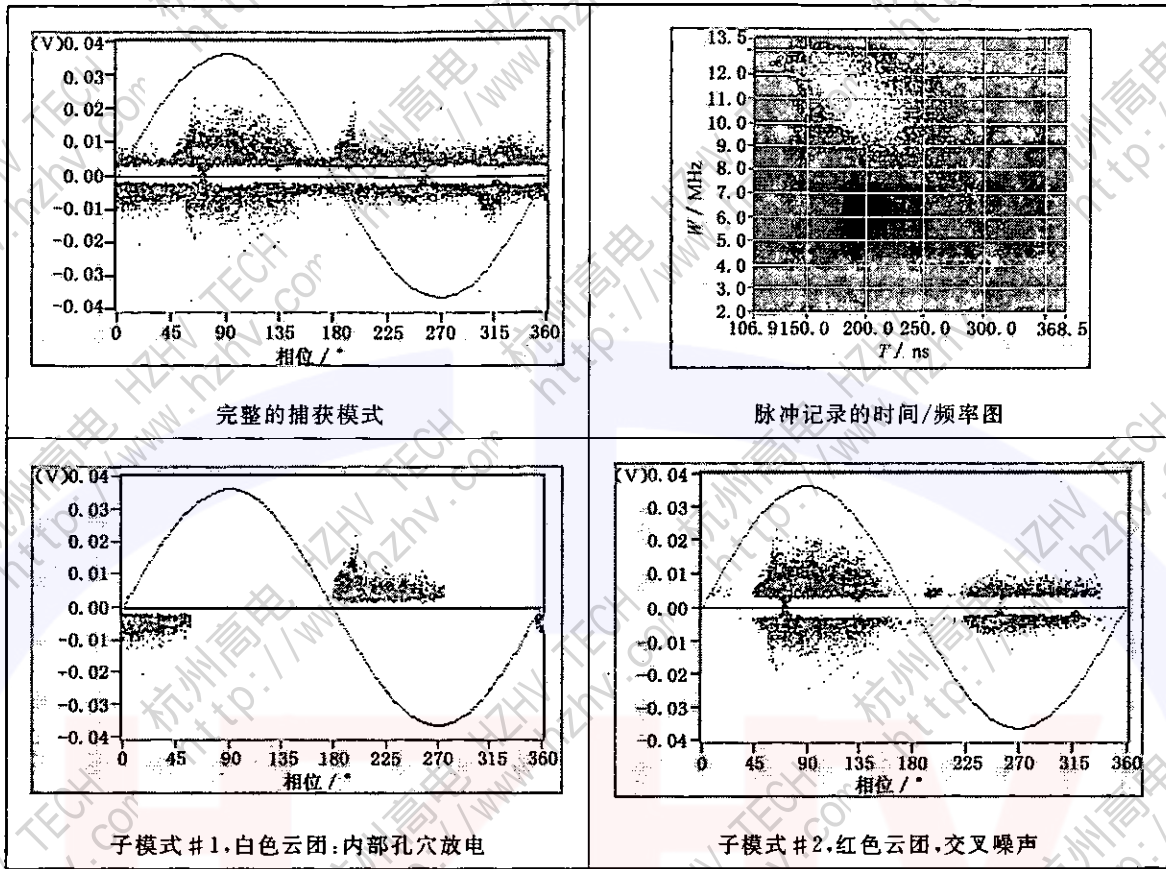


图 E.6 抑制别处传来的骚扰的例子

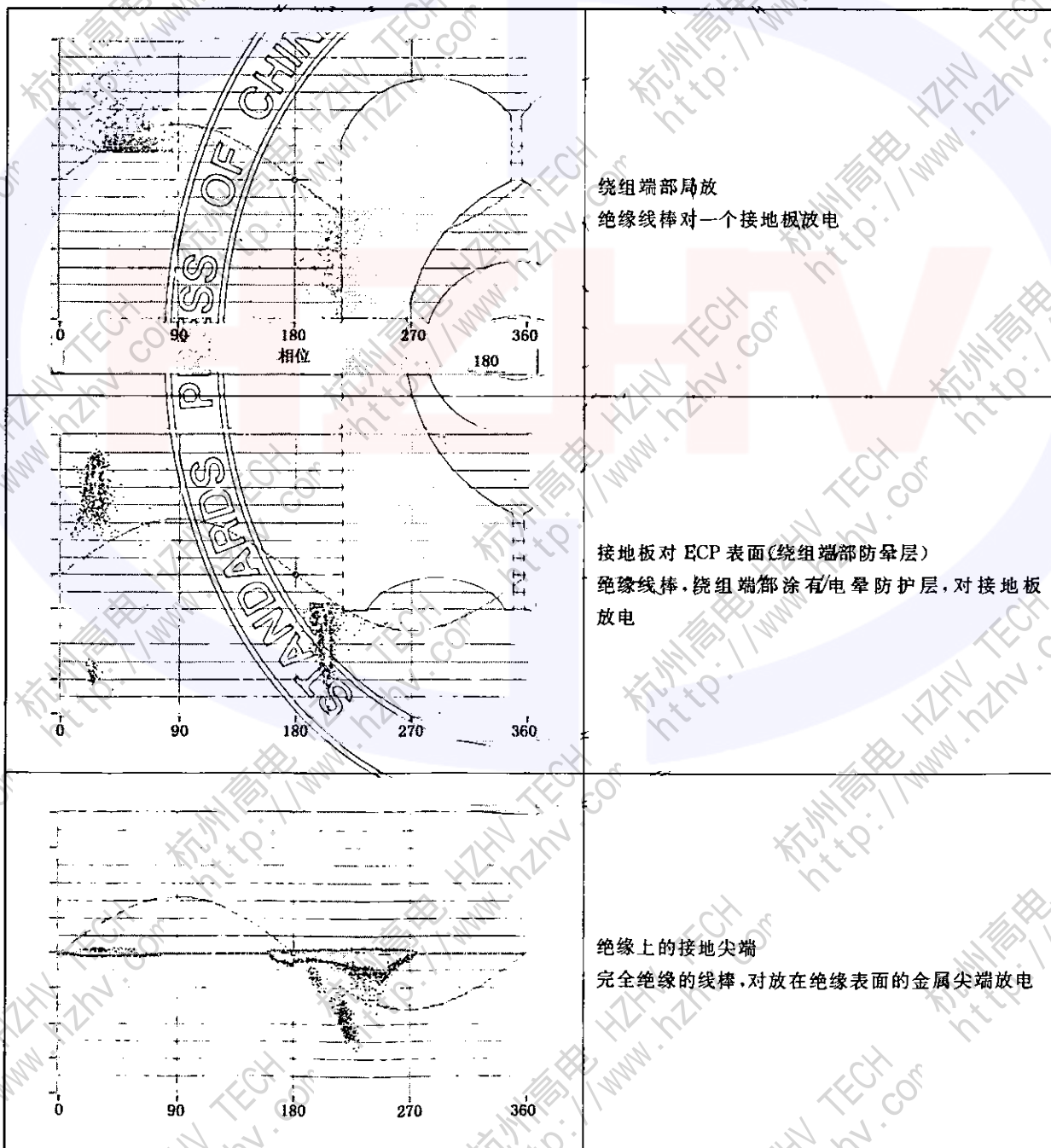
附录 F  
(资料性附录)

局放数据和相位可辨识的局放模式的评价

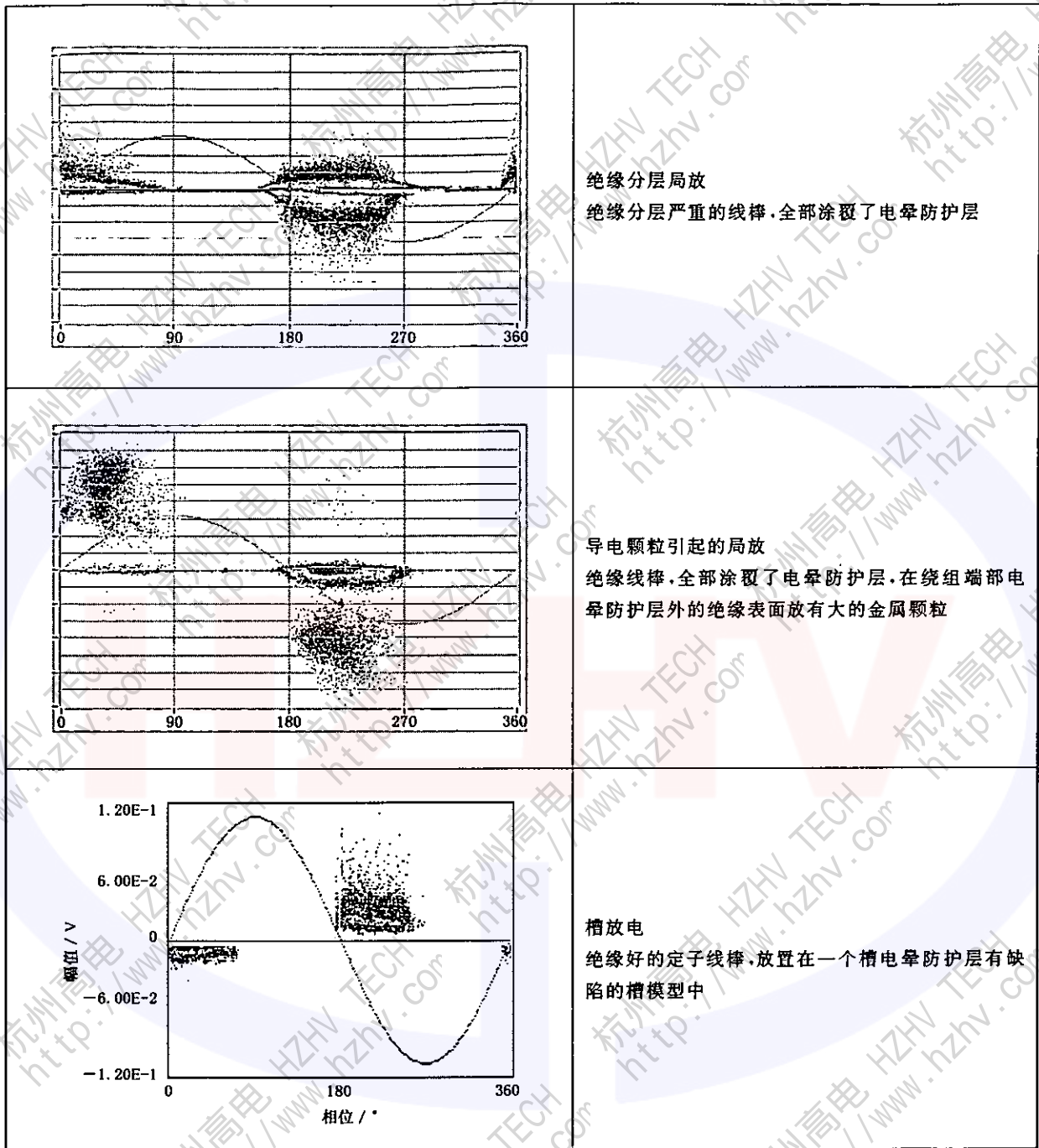
F.1 局放模式评价的说明

F.1.1 局放模式举例

在试验室条件下进行局放测量,观测局部放电过程。如采用合适的测量设备,并显示局放图像模式,可采用相位辨识的  $\phi-q-n$  模式。模式可能会重叠,模式形状、局放频率或其他特征可能会变化。







F. 1.2 基本危险评估

参考第4章(旋转电机中的局放性质),给出提出涉及一些主要局放源相关的危险性,并给出若干基本评价,见下表。

危险评估是以目前的树脂浸渍云母带高压绝缘系统为基础的,随绝缘材料、局放源位置、表面状况等不同而变化。

局放源	危险度	备注
内部空穴 4.2.1.1	低	内部放电是由嵌入主绝缘内的空气或气体形成的小空穴引起的。这些小空穴是在制造工艺过程中形成的,并不代表老化因素。正常环境下,内部放电不会导致绝缘严重老化

表(续)

局放源	危险度	备注
内部分层 4.2.1.2	高	内部分层局部放电是由嵌入主绝缘内的空气或气体形成的狭长的空穴(沿线棒纵向)引起的。这些空穴一般是由过热或者外部机械力引起的,这两种都会导致绝缘层之间的大面积分离
导体和绝缘间分层 4.2.1.3	高	导体和绝缘材料间的分层局部放电是嵌入主绝缘和电场分级材料间的空气或气体形成的狭长的小空穴(沿线棒纵向)引起的。 这些小空穴一般是由过热或者外部机械力引起的,这两种都会导致绝缘层之间的大面积分离
槽放电 4.2.2	高	槽放电是由电场防晕层和定子槽壁间的接触不良或脱落引起。典型的槽放电只出现在电机运行期间。电磁力和振动导致接触性电弧,就是检测到的槽放电。只有在电场防晕层严重老化的情况下,离线测量才能检测到槽放电,也才具有4.2.2中描述的局放源的特征
绕组端部表面放电 4.2.3	正常	绕组端部表面的局放出现在绝缘材料表面的某部位,一般位于电机绕组端部区域。通常由导电的污染物(碳、油灰、磨损物等)引起,或者由端部电场分级材料遭破坏引起。由于放电只出现在绝缘的表面,对绝缘不会产生严重的老化
导电颗粒 4.2.4	正常	导电颗粒的局放出现在绝缘材料表面的某部位,一般位于电机绕组端部区域。它们通常由大面积的导电污染物(碳、油灰、磨损物等)引起,或者由个别电场分级材料的区域引起。由于放电只出现在绝缘的表面,对绝缘不会产生严重的老化

### F.1.3 基本量值评估

局放的实际位置不清楚,是不可能进行这种评估的。例如,表面局放可能比内部局放或分层局放量高十倍或百倍,但这并不是导致绝缘过早失效的老化现象。反之例如,出现分层现象,与测得的局放幅值无关,但该加速老化现象却需要立即维修。

参 考 文 献

- [1] IEEE Std. 1434—2000: Guide To The Measurements Of Partial In Rotating Machinery, IEEE New York, USA, (2000), ISBN 0-7381-2482-6, SH94850
- [2] CIGRE Technical Brochure 226; Knowledge Rules For Partial Discharge Diagnosis In Service
- [3] IEEE Std. 43(r1991); Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency
- [4] IEEE Std. 43—2000 Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [5] DL/T 492—1992 发电机定子绕组环氧粉云母绝缘老化鉴定导则