

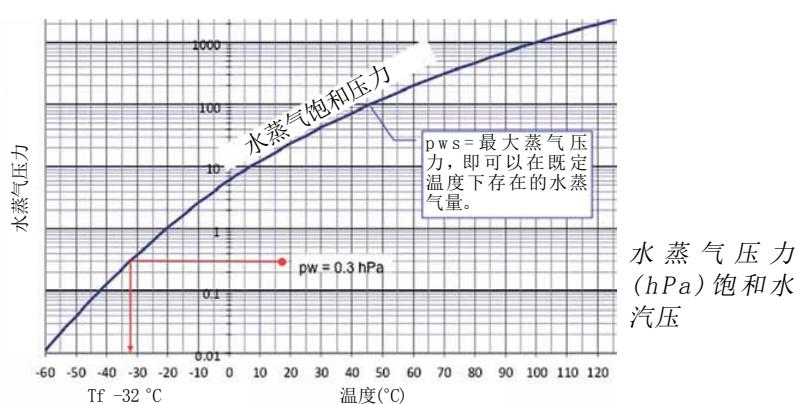
SF6气体绝缘设备的在线露点监测

近年来，SF6露点在线监测越来越普遍。但是在没有气体流动的环境中进行在线测量可靠性的影响因素却并不为人们所熟知。本文介绍了湿度(水气)和水分的时时迁移变化的表现，同时详细说明了它们对安装过程、安装设计和连接器与密封材料选择的基本影响。

为了保持SF6气体绝缘性能并减少因SF6分解形成腐蚀性衍生物的数量，必须让气体绝缘高压设备中的水蒸气气含量保持在最低限度。虽然最初注入的是干燥气体，且设

备是密闭在没有外部气体流入的高压下，但水分子的高渗透能力可能会增加水分含量，尤其是在设备逐步老化过程中。

一直以来，水分含量均通过定期采集气体样本的方式测量。但近年来，采用在线仪表测量SF6气体露点的状态监测系统已经越来越普遍。但很显然，这类应用也提出了新的挑战，完全不同于较为典型的工业露点测量或基本参数测量(如SF6气体绝缘设备中的压力和温度)中遇到的问题。尤其是安装方法，测量系统中使用的材料和接头类型是确定测量能够真正提供资产管理所需的宝贵数据的关键。此外，偏远位置的高压设备往往对状态监测仪器的稳定性和维护周期间隔有着更为严格的要求。



+20°C		
	SF6 @ 4 bar	环境空气
露点	-40 °C	+9.3 °C
相对湿度	0.6 %RH	50 %RH
水蒸气压 (pw)	0.13 mbar	11.7 mbar
+35 °C		
露点	-40 °C	+31 °C
相对湿度	0.2 %RH	80 %RH
水蒸气压 (pw)	0.13 mbar	45 mbar

表1：储气罐和环境大气中，两种不同温度(+20 °C 和 +35 °C)和环境湿度(相对湿度50%与80%)条件下的露点、相对湿度及蒸气压力举例。水分子(H₂O)往往从蒸气压力高的区域向蒸气压力低的区域流动，以求达到平衡。



蒸气水蒸气压力和露点

水蒸气无处不在，因此它始终是气体总压力的一部分，例如，大气(大气压)的压力或气体绝缘设备(GIE)中的系统压力。

露点/霜点($T_{d/f}$)的定义为：一种气体中的部分水蒸气的气体压力(p_w)达到饱和时凝结成液态水/固态霜的温度。

饱和水蒸气压力(pws)。换句话说，露点是指气体必须被冷却至水气凝结成露水或霜时的温度→ $P_w = P_{ws}(T_{d/f})$ 。

露点并不是一个与气体温度相关联的参数，因此可以通过测量在其他温度(而不是系统温度)下采集的样气露点而得出。但露点高度依赖于压力，因此被测点上的压力必须与主气体压力相同或者在知道确切压力值的条件下进行测量，以便能够进行正确的露点数值转换，例如，4巴时的露点或大气压力下的露点。

水蒸气迁移

处于气相(气体)的水分子无拘无束，由于分子体积很小，因此它们可以随意移动。不同浓度的水蒸气趋向于达到相互间的平衡，因此水分子常常从蒸气压高的地区向低的地区迁移，它们甚至会穿过高分子材料(如密封圈)或沿着连接部件的金属表面扩散。这种情况也会出现在气体总压力较低和系统压力较高的设备之间，例如在环境空气与高压设备中的SF₆气体之间发生水分子迁移。因此压力密封并不一定意味着水气密封。这种扩散效应很慢，只有通过在线测量才能发现少量静态气体的变化。

水分迁移

即使没有发生扩散，一个密闭的气体系统内部的水蒸气压力并非总是一成不变。该系统中的温度变化促使水分(水蒸气)在两个相体之间发生迁移，即气体和与气体接触的固体材料间水分子迁移。当温度升高时，固体物质向气体中释放蒸气，使两个不同相体达到水分平衡，即平衡相对湿度；随着温度降低，这一过程逆向发生。气体绝缘设备(GIE)系统内的水分来源包括金属表面和有机材料(如垫片和密封圈)上的孔隙。相对于气体体积，固体材料的表面积越大，水分子迁移效果越显著，露点值变化越大。

图3显示了2010年秋季在芬兰安装的现场仪表所记录下的水气迁移效应。由于传感器被安装在一个很小的模块内，而模块由一条长管和多个连接头与主气室相连，因此传感器周围气体的露点温度并不一定代表主气室内部的真实露点。

目前尚不清楚检测到的水分迁移是否只是发生在主气室内还是发生在放置传感器的采样线路中。由于没有另一个传感器的安装位置，因此没有办法直接对主气室进行对比性测量。

这种安装方式还引起另一个重要因素要考虑，这就是温度。如果传感器被安装在一个远距离的位置，可能会出现传感器所在位置的温度在某个时刻与主气室的温度明显不同，因此主气室与气体采样线路中不同的水分迁移会导致两处气体的水分含量存在很大差异。由于静态气体中的水气扩散是一个非常缓慢的过程，因此测量的露点值并不能代表主气室的露点值。在温度发生持续变化的过程中最有可能发生的是水分动态迁移也在不断进行中，即没有达到湿度平衡。

在进行压力或密度测量时，这种安装方式不会产生问题。但在进行露点测量时这可能会导致错误结论。由于检测的是少量静态气体中的湿度，所以在线测量时也能观察到采样气路中迁移所带来的少量水气。



图2：安装到室外“传感器模块”中。

安装在线露点传感器

当为SF6气体绝缘设备内的露点传感器设计在线测量时，应考虑前面所述水蒸气特性基本原则，以确保测量的正确性，避免得出错误结论。一直以来传统的SF6气体露点测量是通过从气室中采集气样完成的，这意味着在测量时总是会存在气体流动。气体流动掩盖了非常缓慢的扩散效应及气体和固体材料之间的水气迁移。

目前人们通常会将露点传感器与压力继电器或密度传感器安装在同一个传感器模块中。此外这些模块往往不能直接安装到主气室上，而是要通过高分子聚合物管或金属管连接。这些不同的连接点和金属管有可能为水气扩散提供了空间，并充当了水分迁移的载体。在静态气体体积相对较小时，这些效应往往发挥了主导作用，因此利用上述方式安装露点传感器方式可能会导致测量不能为资产管理提供有价值的预期数据。

为了确保SF6气体绝缘系统中的在线露点测量效果最佳，应将传感器安装在尽可能靠近主气室的地方，最好是直接放置在罐壁上。最大限度地减少连接点并避免在测量单元旁边使用塑料或橡胶材料，这些都有助于测量结果的准确。如果条件允许应优先选择金属对金属的密封方式。

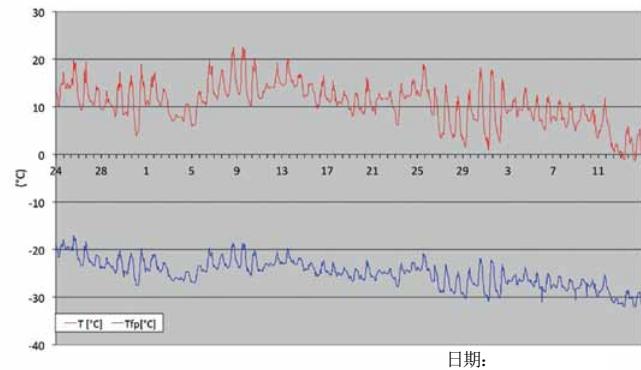


图3：在芬兰的SF6气体绝缘开关露点(T_{fp})与温度测量(2010年秋季安装)。

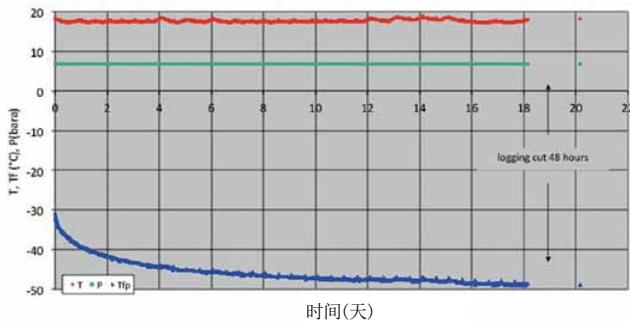


图4：室内系统上的露点、压力与温度测量数据

传感器安装后的系统响应

气体绝缘设备(GIE)中的露点测量响应时间并非由传感器本身的响应时间所决定(通常以秒或分钟为时间单位)，而是由安装后的整个测量系统响应时间所确定。安装时，传感器周围空气中的水分也被引入到系统的连接部位。对比于SF6气体的总量，这些水气可以忽略不计。然而从测量单位内部的传感器角度来看，这些水蒸气的影响非常显著，而且可以被测量到。测量单元内部与主气室内的水气压力达到平衡将需要相当长一段时间。即使传感器安装在非常接近主罐的位置，其周围的蒸气压力及露点与主气室达到平衡时也需要数小时甚至数天时间。

系统的响应时间取决于测量单元内的干燥速度，即与SF6气体绝缘装置主气中的蒸气压力相同，也就是取决于水分子从固体材料运动到测量单元的气体中，然后返回到气室，最终达到平衡的速度。气体越干燥，固体材料及表面所需的干燥时间越长，特别是在静态气体中。两者间的距离及SF6气体的干燥程度会影响气体从测量单元返回气室的扩散率。距离越长、气体越干燥，实现100%正确反应的时间越长。如果金属管或连接点的扩散量过大，那么也可能导致测量单元内的蒸气压力与主气室将永远无法达到平衡，因此测量结果就不能反映气室内的真实情况。



图5：直接将露点-压力-温度传感器(DPT145)直接安装在气室上(2010年3月25日至4月14日)。测量单元中的气体大约有20毫升。

在传感器安装过程中尽量将最初的水分引入降至最小，这一点非常重要。为了避免水滴滴入到传感器连接部件中，不应在雨天进行安装。安装时应非常小心，确保密封表面没有灰尘或污物颗粒，因为它们以后可能会成为水分子扩散的介质，破坏测量结果。更坏的后果是使SF6气体变得潮湿。在室外安装时应使用防雨罩，防止雨水汇集到连接点上，进而增加蒸气扩散的机会。

设备运行期间的系统响应

I传感器安装后的测量系统响应速度相当缓慢，当气室内SF6气体的露点开始升高时，人们自然会问传感器测量系统将如何响应？

导致这种初始反应缓慢的最主要的因素是固体材料表面孔隙的干燥需要很长时间(即使气体流动的情况下)，静态气体的干燥显然需要更多时间。这种现象只对含有更多水分的气体从气室向较为干燥的测量单元(在此处测量露点)扩散时具有轻微影响。

第二个需要考虑的因素是，当SF6气体量较大时，通过密封材料或沿金属表面的扩散导致露点升高是一个非常缓慢的过程。显而易见当主气室中露点开始上升时，测量单元中的露点也相应地上升，并同时被传感器或多或少检测到——前提是传感器与气室的距离足够接近。

测得的露点值是否为同一时间点(100%响应)的确切值并不重要，因为它体现的是一种不断增加的趋势，提醒人们需要采取维护措施，防止趋势继续增加。

任何迅速、剧烈的露点变化都能被露点和压力测量同时检测出，这意味着有泄漏发生。

总结

为了确保在线测量系统能够提供可靠而有价值的露点数据，最大限度地减少不确定性，关键是要特别注意露点传感器的安装设计和安装过程。使用的传感器的质量和长期稳定性也是一个关键因素。直接把传感器安装到主气室上将取得最好的测量结果。连接部件和接近传感器的密封圈应只使用高品质的金属材料。只有确保传感器读数达到SF6主体气体的露点值，人们才有可能确定，通过连接部件和/或管路所产生的任何过多的水气扩散没有对测量造成干扰，且所测得的数据长期可靠，从而避免任何误报。