

QUALITROL®

2020年8月 · 发电

前沿的变压器套管监测技术

Thomas Linn, Qualitrol – 瑞士



摘要

变压器套管是变压器的关键部件。如今，多达20%的高压变压器重大故障都可能与套管有关，且这些故障中几乎有一半最终会导致灾难性故障，例如爆炸、火灾或漏油。这些损坏和停止输电导致的成本可能比套管本身的价格高出数百倍。即使是不会导致灾难性故障的故障套管，也可能因为瓷绝缘子破裂并在击穿电弧的作用下弹射到空气中，而对人员造成伤害。

套管监测旨在检测早期故障并提供提前预警，并将套管使用至其使用寿命真正结束。这需要对套管主绝缘耗散因数进行高精度测量。

关键词

套管
在线监测
CBM
资产健康
相移法
损耗因数
套管电容

本文将简要介绍相关的故障统计和不同参数，它们可用于评估套管状态及其在线监测的可用性。另外，本文还将说明套管故障的不同原因，并讨论如何通过耗散因数和电容监测在早期阶段检测到这些故障。

为了实现可靠的监测系统，监测参数的测量精度需要非常高。例如，即使大量水分侵入套管芯中，在环境温度下损耗角也只会显示微小的变化。当今的套管监测系统无法捕捉到这些微小但重要的变化，因为它们会同时比较不同相位的三个套管，并且公共配电和输电网络中存在三相不平衡。

新方法使用稳定的电压源作为参考信号（最好来自与被监测套管相同的相位），并使用套管泄漏电流信号与参考电压之间的相移来测量损耗因数。其测量精度可高达0.1mrad，能够检测微小的耗散因数变化。

Sloy-Windyhill-Dunoon T接回路

这条回路于1950年代建成，是一条使用钢塔“轻型”结构的132KV双架空线路。从2006年开始，无法解释的故障活动不断增加并被发现起源于Dunoon的T接线路段。该T接线路段穿过的地形都是树木繁茂的丘陵和山谷，并有一长段跨越了海湾。其最大海拔达到370m，并且有几个靠近大海的线路段。完整回路的简化线路图如图1所示，其中一座线路铁塔如图2所示。在过去的一年里，使用行波测量对线路段长度进行了细化。

故障统计

变压器是电网中的关键组件，一旦出现故障，将无法轻松更换新变压器。变压器故障通常会导致输电中断，并且极有可能对人员造成伤害及导致环境灾难。因此，变压器故障通常会带来严重的财务影响。

欧洲、北美和日本等旧经济体尤其还面临关键电网组件不断老化的问题。由于主要设备的n-1可用性，连续监测解决方案过去没有被广泛应用。此外，10到20年前，监测解决方案的可靠性较差或者并不可用。尽管如此，在旧经济体的电力公司中，状态评估是基于全面的定期测量和维护计划进行的。如今，这些电力公司正在更多地寻求能将其昂贵的组件运行到其使用寿命真正终结的解决方案。此外，资产更换计划将基于设备的状况制定。状态监测和基于状态的维护被视为实现这些目标的重要手段。

CIGRE WG A2.37于2012年发布了一份中期报告(1)，其中显示了变压器故障的最新统计数据（见表1）。

表1: 变压器故障统计 (1)

故障和数量信息	69 kV < 100	100 kV < 200	200 kV < 300
故障	145	212	163
变压器x年数	15220	48994	47473
故障率/年	0.95%	0.43%	0.34%
故障和数量信息	300 kV < 500	kV 700	所有
故障	154	11	665
变压器x年数	41569	959	156186
故障率/年	0.37%	1.15%	0.44%

从表中可以看出，所有电压等级的故障率为0.44%，这意味着在大约230台变压器中，每年会有一台发生故障。除了故障预防或早期发现即将发生的故障外，对设备剩余寿命和健康状态的评估也引起了人们的强烈兴趣，尤其是对于老化的设备。为了评估资产健康状态，需要测量/监测来自自主变压器及其主要组件的一组数据。相比于其他组件，套管是变压器故障的主要原因之一。它导致的变压器故障约占所有变压器主要故障的20%，具体取决于变压器的类型。

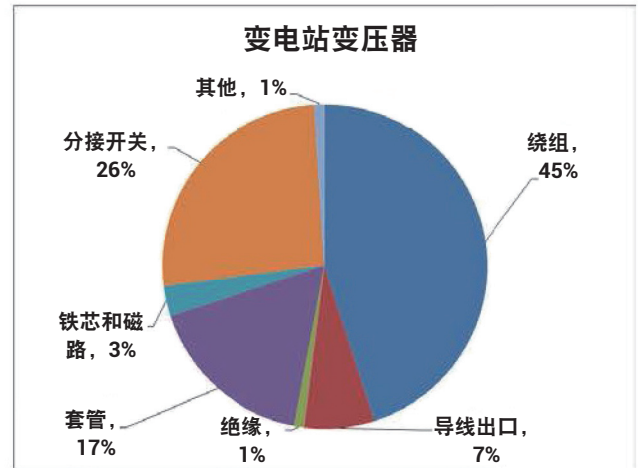


图1: 故障组件的统计 (1)

套管故障可能进一步导致灾难性故障，并可能伴随环境灾难或致命的人身事故。根据文献(2)中发布的变压器可靠性研究，所有变压器火灾中有70%是由套管故障引起的。

套管故障的原因多种多样，包括正常老化、潮湿、制造过程中的质量问题、反复的机械和热循环、瞬变以及外部闪络等外部影响。因此，大量套管故障是由局部击穿、热不稳定性或纵向绝缘界面劣化引起的。

套管的平均寿命一般估计为变压器寿命的一半（25年）。实际上，有些套管已经正常工作了超过40年，但也有些套管在运行10到12年后就已经失效。为了提高变压器可靠性，整个行业对于可靠套管监测的需求日益增加。

套管监测参数

目前用于套管在线监测的主要套管参数是IEEE标准的功率因数（或IEC标准的耗散因数）、套管主电容和局部放电活动。表2概述了不同的套管参数及其在故障发展早期阶段检测不同故障的能力。

从表2中可见，耗散因数和局部放电是最有效的参数，它们能够发现大部分的早期套管故障。电容监测是局部击穿（击穿两层或多层绝缘，导致它们之间短路）和接触问题（电容降低或剧烈波动）的良好指标。此外，将讨论每个参数对于电容套管健康状态在线评估的最佳用途。

表2：不同缺陷的参数灵敏度
(+ 可检测；- 不可检测)

缺陷	Tan δ	C	PD
绝缘老化	+	-	-/+
微水	+	-	-
空隙/分层	(+)	-	+
表面污染	+	-	+/-
表面放电	+/-	-	+
局部击穿	+/-	+	+/-
接触问题	+	+	+

作为绝缘材料的特性，功率因数反映了绝缘本身的状态和健康状况。它表示容性电流与阻性电流之间的比值，两者的总和是泄漏电流。

容性电流是由电容层设计决定的，因此可提供给定值。阻性电流由绝缘材料的电阻率定义，是绝缘系统质量的直接参数。每种健康的固体和液体绝缘材料都有其典型的阻性电流分量。阻性电流增大表明绝缘系统劣化，以及角度 δ 增大和角度 ϕ 减小，并将导致耗散因数增大（参见图2）。

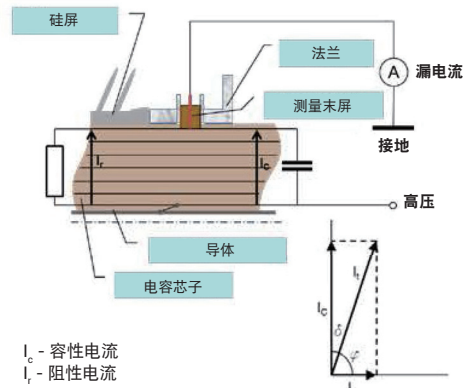


图2：漏电流和耗散因数 (tanδ)

在线状态下的耗散因数测量需要高精度，以检测很小的数值变化并确保检测绝缘系统中不断增大的水分含量，而这在在线状态下很难实现。低频磁场、外部噪声和谐波等外部影响，以及缺乏稳定的参考信号源都是影响这些测量的因素。

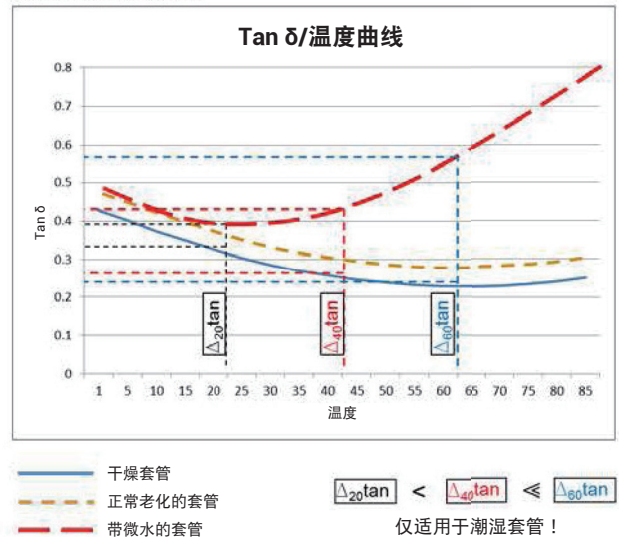


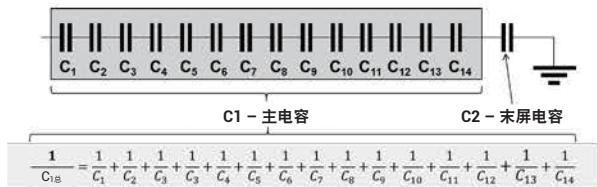
图3：耗散因数取决于温度和湿度

图3显示了绝缘系统在微水含量增加情况下的特性。考虑到干、湿绝缘在20°C时的耗散因数差异，耗散因数监测的精度需要非常高。而使用目前的在线监测方法，很难实现这种精度。

在线耗散因数监测的优点是可以查看不同温度下套管的耗散因数。根据变压器的负载变化，套管的温度会升高或降低。从图3中可以看出，“湿”套管的耗散因数梯度在较高温度下要远高于干套管。没有套管额外主动加热的离线测量，以及低精度的在线监测都无法检测到这类缺陷。

电容

如上文针对容性电流的描述，电容是代表电容层设计的参数。图4显示了总电容的计算方法。如果两层或多层电场控制箱短路，则电容会增大（参见图4）。如果只有两层控制箱短路，则电容将增大相对于总层数的百分比。例如，如果总共50层中有2层短路，则电容将增加4%。



虽然通过使用定义的次级电容器可以很容易地实现在线监测，但是可检测的缺陷数量有限（见表2）。

局部放电

从表2中可见，除了微水之外，所有套管缺陷都可以通过局部放电检测。因此，局部放电 (PD) 测量对于工厂或现场的离线测试非常重要。然而，在线状态下的套管相关局部放电检测面临着重大问题。

目前使用的在线局部放电套管监测的测量原理是基于IEC 60270方法。套管电容将被用作耦合电容器。这种局部放电监测原理主要用于监测变压器，但某些情况下也用于监测套管。

早期套管故障的局部放电幅度在5pC到100pC之间。如果出现接触问题，可能会更高。通常情况下，典型幅度值低于50pC。相比于架空线路（nC级）上和变压器内部允许和可能的局部放电活动，与套管相关的局部放电可能会被覆盖。这使得不同的局部放电源更难以区分，如架空线路、变压器、外部放电和套管本身。

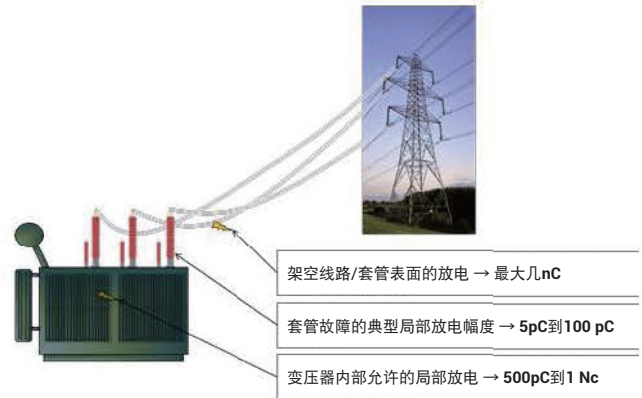


图5：套管在线局部放电监测的挑战

此外，由于测试对象的高电容和典型的内部背景噪声，使用套管作为耦合电容器的局部放电监测的灵敏度相当有限。

在线监测的建议参数

根据上述情况，可以得出的结论是套管局部放电在线监测只能提供套管健康状态的有限信息。

更有希望的参数是电容和耗散因数。可以使用不同的方法专门监测套管的这些参数。详细讨论请参见下一节内容。

当前使用的套管监测方法概述

目前用于套管监测的最新方法是参考信号法，该方法会测量套管漏电流的相移及其稳定的参考信号。本文首先将概述当前使用的方法及其优缺点，然后再进一步讨论该方法。

电容监测

电容监测是进行在线套管监测最易于实现的方法之一。它的主要目标是检测一个或多个电容层之间的局部击穿。

在套管末屏和地线之间将添加名为C3的次级电容器（参见图6）。这种情况下，主电容C1和测量电容C3代表了电容分压器。虽然可以假设高压或中压电网的一次电压相对稳定，但可以通过C3两端电压的增加来检测局部击穿。基本上，二次电压（C3两端）永久增加5%到10%表明已经局部击穿。

电容法的缺点是只能检测到测量路径中的局部击穿和接触问题。此外，即使对于更高的电压等级（420kV及以上），电容层的数量也在60到100层之间，具体取决于电压等级和套管供应商。如果某个电容层短路，则电压增加在1%到1.6%之间。由于高压电网的电压幅值波动超过了2%，因此即使是两层间的局部放电也难以检测到。为了克服这个缺点，可以使用二次电压和一次电压的直接比较，其中一次电压（例如VT或CVT）或数字数据来自于变电站控制系统。然而，相比于仅测量C3的二次电压，这将使系统变得更加复杂。

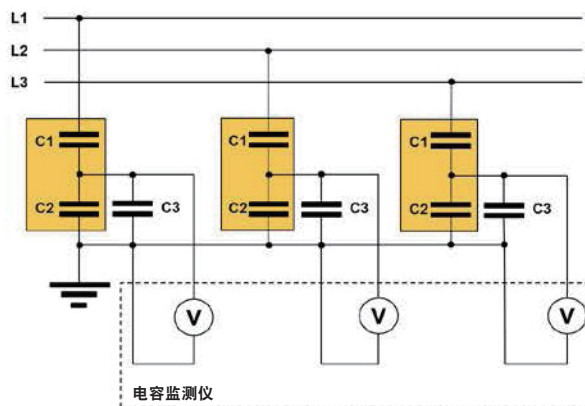


图6: 电容监测的原理

平衡电流法

平衡电流法也称电流求和法，是当前最常用的套管监测方法。其工作原理是不同相的三个套管的漏电流之和为零（见图7）。理想情况意味着电压的幅值完全相同，相间的相移正好是120度，并且所有套管的类型一致、温度相同。

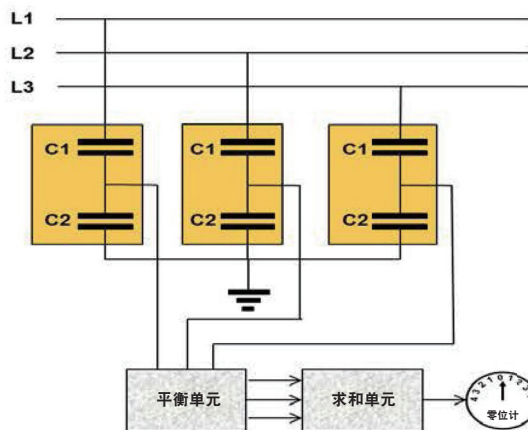


图7: 平衡电流法的原理概述

在现实世界中，电网承载着或多或少的不平衡负载。对于“旧经济体”中成熟稳定的电网来说，1%到1.5%的电压幅值和0.2度的相角变化的三相不平衡是非常常见的。在世界其他地区更不稳定的电网中，可以看到更高的三相不平衡。根据负载状态，三相不平衡会按照每日、季节性和不可预测的方式发生变化。由于相比于上文的纯电容监测，该方法的原理可以更好地补偿三相的电压幅值一般波动，因此可以更准确地检测套管的电容变化（局部击穿）。但是，即使电压幅值不平衡仅为1.5%，对于500kV及以上电压等级的局部击穿的准确检测仍然是挑战性的。如果不平衡性更高，则对于较低的电压等级也将更难以获得可靠的结果。

这种方法的另一个挑战是相角的相位不对称。如果相角不平衡只有0.2度，则意味着耗散因数的偏差已经是0.349%（ $\cos f$ ，其中 f 为 $90^\circ - 0.2^\circ = 89.8^\circ$ ）。健康OIP（油浸纸）套管的耗散因数约为0.250%！用于检测湿度（比较图3）的功率因数的微小变化是无法检测的。

如今的现代系统正在使用自主学习系统，该系统可记录套管的典型日常行为和季节性行为，从而预测负载状态。然而，测量耗散因数可实现的精度是有限的。

由于上述事实，这种方法对于单相变压器的可用性也受到限制。

在线套管监测的新方法

如今，提高功率因数和电容监测精度的最大缺点是套管将在各个相之间相互比较，并且相间不平衡是不稳定的并且远远不能忽略。

克服这个缺点的唯一方法是在被监测套管的相同相位内找到一个与负载无关的参考信号源。

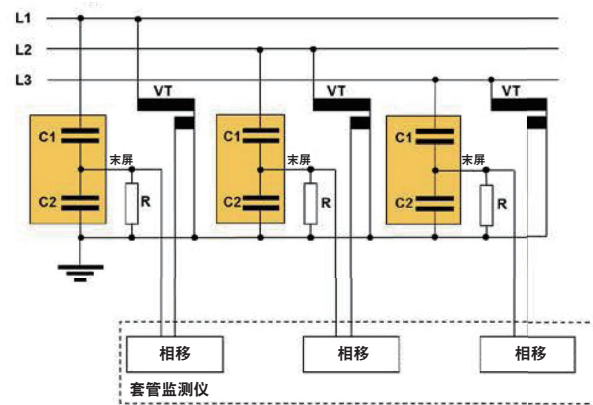


图8: 参考信号法的工作原理

用于离线测量和例行测试的标准电容器（充气）的安装成本太高，并且对于EHV装置来说会增加开关站的尺寸。另一种可能是使用电压互感器。电压互感器（VT）的次级绕组上始终具有稳定的负载。此外，电压互感器（VT）不会根据电网负载改变其传输特性。作为纯测量原理，泄漏电流和参考信号之间的相移测量可以充分减少所需的硬件，完成信号数字化后，所有信号处理都将通过软件算法完成。图8显示了使用同相电压互感器（VT）的参考信号法工作原理。

由于使用来自同相的参考信号，可实现的精度不取决于相位不对称。

使用该方法的主要挑战是消除或限制噪声，以及稳定参考源的可用性。特别是稳定参考源并不总是能够提供。有时在高压侧或远处的单独开关站（特别是发电厂）中会有VT/CVT，或者仅在一个相（主要是中间相）中有VT/CVT。替代方法正在开发中。

信号处理

- 噪声和谐波需要通过先进的软件算法消除
- 相位测量的精度优于0.1mrad (0.0057度)
- 精度能够检测tan δ的变化，例如0.325%到0.340%
- 这能够早期检测到微水增加以及绝缘系统老化和劣化
- 实现该精度必须进行温度补偿

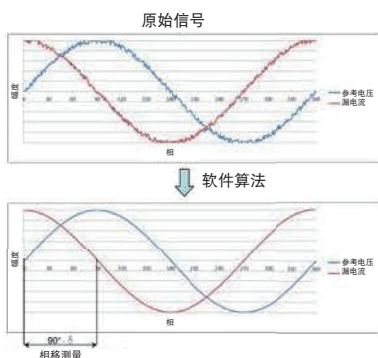


图9：有效消除噪声的示例

消除或限制噪声是实现0.0057度（或0.1mrad）相移测量精度的主要要求之一。

图9显示了信号处理前后的噪声信号，说明了噪声消除算法的效率。

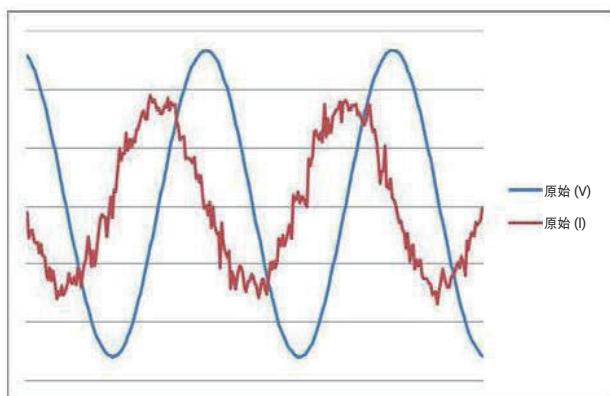


图10：现场的原始数据示例

此外，图10显示了记录的原始数据的另一个示例。由于幅度相对较高，参考源的信号（蓝色曲线）几乎不受干扰，而套管末屏的信号则有约15%到20%的噪声分量。

结论

在实验室和套管制造商的高压实验室中使用真实套管和变压器进行的测量结果表明，相比于进行相间比较的套管监测方法，使用这种方法测量/监测功率因数的准确性更高。实验室中实现的结果显示出比上述测量数据更好的稳定性和精度（小于0.0057度故障）。这一点还需要在现场设备上进一步验证。

该方法在套管监测中的广泛测试和首次应用表明，通过使用参考信号法和同相的参考源，该方法能够检测到很小的耗散因数变化，并且还能够检测仅两个电容层之间局部击穿所导致的电容变化，即使对于额定电压等级1MV的套管也是如此。此外，这种方法还可以不受限制地用于单相变压器/电抗器。

另一个发展领域是开发和测试一种简单的设备，以便为那些没有VT/CVT或只有单相的变压器生成可靠的参考信号。

参考文献

1. CIGRE WG A2.37. *Transformer Reliability Survey: Interim Report. s.l. : No. 261, ELECTRA, 2012.*
2. Berg, H.-P. and Fritze, N. *RELIABILITY OF MAIN TRANSFORMERS. Salzgitter, Germany : Bundesamt für Strahlenschutz, 2011.*



如需有关产品和解决方案的
更多信息

请联系我们: cs.china@qualitrolcorp.com