

[控制系统]

干式变压器在线综合监测与故障预警系统的实际应用

文/中海石油（中国）有限公司天津分公司 倪先锋 欧阳俊 张文亮 朱 峰

锦州25-1南油气田与油建电仪控合作，成功地在容量为10 000 kV·A干式变压器上安装了在线监测系统，通过对变压器的温度、振动、运行的电压电流、局放等参数进行监测，实时观测其运行状态，为海上电力系统的安全、平稳运行提供了可靠的保证。

海上平台电力系统作为整个油气田的能量传输系统，在海上平台起着极其重要的作用，变压器作为电力系统中的变电设备，是电力系统中重要设备之一，对于无发电机的平台，为其送电的变压器相当于能量源头，作用更是重中之重。在以往的工作中，运行中的变压器只能通过看、听、摸等简单的检查手段进行日常的检查，若想进一步检查只能对变压器进行断电隔离，更不能及时发现运行中的隐患。

锦州25-1南油气田是辽东作业区锦州25-1南油田群的油、气、电中心平台，油田群电网是将锦州25-1南油气田、锦州25-1油田的主电站通过变压器、高压盘和海底电缆连接在一起。锦州25-1S CEP平台设有4台solar燃气透平发电机组（6.3 kV/11 947 kW），锦州25-1 CEP平台设有两台相同容量的solar燃气透平发电机组，两电站之间通过4台6 300 kV·A变压器及一条35 kV海底电缆相连接实现电力共享的同时，该电站还通过锦州25-1南油气田与金县1-1的35 kV海底电缆向金县1-1油田供电。金县1-1油田共有2座平台，中心平台（CEPA）和井口平台（WHPB），两座平台相距4.1 km。

随着后期的滚动发展，金县1-1油田的油气产量不断增加，其电力负荷也随之增加。作为供电平

台锦州25-1南油气田透平发电机发出的6.3 kV电能通过2台容量为10 000 kV·A干式变压器升压至35 kV后，再通过距离为31 km的海底电缆送至金县1-1油田。因此，两台升压变压器能否正常运行直接关系到金县1-1油田的生产。

为了不断落实公司新的设备管理理念：将原来的计划性维修逐步转变为主动维修，将预知性维修与状态监测相结合，通过基于风险的管理从而建立一个完善的、系统的、贯穿于设备整个生命周期的资产完整性管理体系。锦州25-1南油气田成功应用了“干式变压器在线综合监测与故障预警系统”，该系统的建立和应用大大提升了油田群电气设备的管理。

变压器在线监测系统简介

1. 变压器简介

众所周知，变压器是根据电磁感应的原理，利用电磁互感应，变换电压、电流和阻抗的装置。它主要由铁心、一次绕阻和二次绕阻、分接变换装置、冷却系统及绝缘系统等组成。原则上这些部件都有可能发生故障，同时这些故障也是可以相互影响和依存的。根据相关资料分析的结果表明，各类型变压器尽管老化趋势及使用不同，但故障的基本原因相同。其中主要因

素包括：误用、振动、过高的操作温度、涌流、过负荷、对控制设备的维护不够、清洁不良等。对于干式变压器而言有两大主因：热和电（即局部放电）。

（1）热

导体、铁心、紧固件以及绝缘系统的过热出现的变压器的故障。

- 1) 由绕组和铁心的过热产生。
- 2) 由感应电流或者损耗产生。
- 3) 局部的过热会影响其周围的绝缘。

（2）电

- 1) 轻微的放电现象使绝缘水平降低。
- 2) 电弧。
- 3) 大电流和高温。
- 4) 短路前的瞬间电弧。

因此如何正确维护干式变压器，保证其良好运行，从而保障正常供电需要从上述两个方面进行。在以往的工作中，对于运行中的变压器我们只能通过简单日常巡检和定期的停运对其进行检查维护，观察各个紧固件有无松动发热，绕组绝缘表面有无龟裂、爬电和碳化痕迹，声音是否正常，对于变压器内部绝缘情况，在运行期间我们无法得知，只能在停产时期进行预防性试验。而电力设备的绝缘部分是薄弱环节，最容易被损坏或劣化。绝缘故障具有随机性、阶段性、隐蔽性。绝缘缺陷大多数发生在设备内部，从外表上不易观察到。微弱的绝缘缺陷，特别是早期性绝缘故障，对运行状态几乎没有影响，甚至绝缘预防性试验根本测试不到。这就决定了定期的预防性试验无法及时准确地发现绝缘隐患。

2. 局放监测的几种方法

变压器局部放电检测按检测的物理量性质分为电测法和非电测法，根据局部放电过程中所产生的各种放电现象，相应的有脉冲电流法、超声波检测法、红外检测法、气相色谱检测法、射频检测法及超高频检测法等检测方法，这些检测方法各有其优缺点，在现场得到了不同程度的应用。

（1）脉冲电流法

当变压器内部发生放电时，电流传感器（Rogowski线圈）两端会有一个瞬时的电压变化，在与之耦合的回路中就会产生脉冲电流，将脉冲电流通过检测阻抗或电流传感器转换成脉冲电压予以采集、放大和显示等处理，就可测定局

部放电的基本信息，如视在放电量、放电次数以及放电相位。它是研究最早，广泛的一种检测方法，IEC和我国均对此制定了专门的检测标准。

其优点在于灵敏度高，可定量测量局部放电的特征参数。其缺点是测试频率低、频带窄、信息量少，易受外界干扰噪声影响，抗干扰能力差，尚未做到在线检测。

（2）超声波检测法

当变压器内部发生放电时，会伴随有超声波能量的放出，通过测量局部放电产生的声波来检测局部放电的大小及位置。近年来，由于声—电换能器效率的提高和电子放大技术的发展，声测法的灵敏度有了较大的提高，对于大电容量的试品，其灵敏度不比电测法低；利用声测法可以有效地测定局部放电的部位。

其优点在于可避免电磁干扰的影响，便于空间定位，易于实现在线检测。

（3）红外检测法

当变压器内部发生放电时，内部产生的电热能量转换，检测局部区域的表面温度升高的变化。红外热像仪用于定性测量有其重要意义，对于复杂的绝缘结构，红外热像法需要借助于计算机进行辅助计算，可以得到一定的量化关系。

目前，变压器红外检测主要是针对变压器外部故障，如导体连接不良、漏磁引起的箱体涡流、冷却装置故障和变压器套管故障等，将这种方法用于定量研究还存在困难。

（4）气相色谱检测法

在电力变压器内部发生放电可导致绝缘材料分解产生新的生成物，通过检测生成物的组成和浓度，可以判断局部放电的状态，局部放电产生的气体生成物，主要包括 C_2H_4 、 CH_4 、 C_2H_2 和 C_2H_6 等烃类气体和 H_2 、 CO 、 CO_2 等，放电产生的气体与放电能量是紧密相关的。油色谱分析可定期进行油中的气体分析，也可进行在线的对特定气体浓度的在线监测，目前已用于变压器油气分析。

其缺点是气体传感器对所检测的各种气体均敏感，导致检测准确度不高，并且所获得的气体信息为长期异常现象产生气体的累加，不能反映突发性的故障和局放源的空间位置。

（5）射频检测法

利用Rogowski线圈从变压器的中性点处提取信号，信号检测频率可达30 MHz，大大提高了局

部放电测量频率。射频检测法具有测试系统安装方便,检测设备不改变电力系统的运行方式等优点,随着数字滤波技术的发展,射频检测法得到了较广泛的应用。

其缺点是对于三相电力变压器,得到的信号是三相局部放电信号的总和,无法进行分辨,且信号易受外界干扰。

(6) 超高频检测法

利用局部放电所产生的超高频(300~3 000 MHz)电信号,实现局部放电的检测和定位,并实现抗干扰。克服了传统的脉冲电流法测量频率低、频带窄的缺点,可以较全面地研究局部放电的本征特征。

其缺点是变压器绝缘结构复杂,电磁波在传播中会发生多次折反射及衰减,而且变压器箱体结构也会对电磁波的传播带来不利的影响,这就大大增加了超高频局部放电检测的难度。超高频检测技术近年来得到了较快的发展,在一些电力设备(如GIS、电动机、电缆、变压器等)的检测中已经得到应用。因而在局放检测(特别是在线检测)中将有广阔前景。

近年来,变压器局放在线监测研究方向主要集中在超高频和超声波监测。

目前,国内外对变压器局部放电超高频检测的研究还主要集中在实验室中,现场的工作较少,并且检测系统中所用仪器如频潜分析仪、高速数字示波器等不但价格昂贵且不适合在现场长期运行。而对变压器超高频信号的抗干扰技术的研究仍不充分,同时也非常有必要对适合变压器现场运行特点的小型化、高检测性能的超高频传感器进行研究。在局部放电类型判别和检测规程建立等方面,也需要进行试验研究和经验积累。因此,对变压器局部放电的超高频检测进行研究仍需针对上述问题开展工作。

传统的超声波局部放电检测方法,其检测信号的频率一般不超过1 MHz,而且现场局部放电检测特别是在线检测,外界干扰信号少因而检测系统受外界干扰影响小,可以极大地提高变压器局部放电检测,特别是在线检测的可靠性和灵敏度。此外,由于电力变压器的箱体厚度一般在厘米数量级,将测量传感器置于变压器箱内,可有效屏蔽变压器箱外部空间的各种电磁干扰信号,进一步提高变压器局部放电检测系统的抗干扰能力。正因为超声波局部放电检测具有极强的抗干

扰能力和较高的灵敏度,用此法检测变压器局部放电具有良好应用前景和工程价值。

3. 变压器在线监测系统介绍

锦州25-1南油气田变压器在线监测系统可分为“硬件”和“软件”两大部分,其中硬件部分是通过采集变压器一次电压、电流信号、变压器本体局部放电信号、变压器温度湿度状况、变压器振动信号,通过光纤传输至系统的“软件”部分。再通过对数据的分析和处理,来判断变压器是否出现异常情况运行,一旦变压器出现故障现象系统及时发出报警信号,从而达到平台电力系统可靠的运行。系统框架图如下图所示。

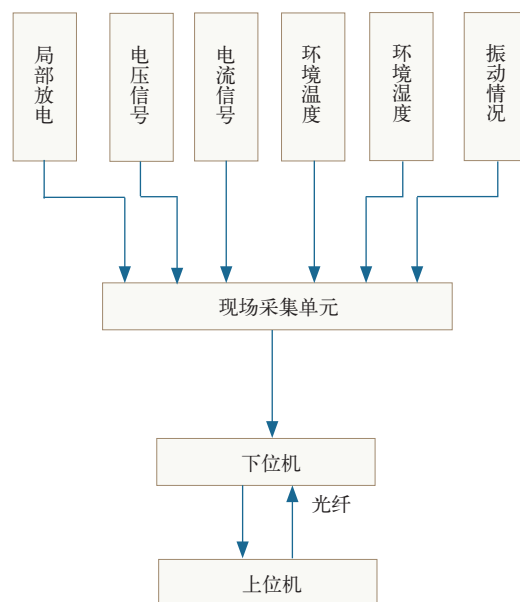


图 系统框架图

(1) 电压、电流监测单元

为了不影响变压器保护继电器的电流保护功能,电流信号取自变压器进线柜的二次电流测量回路。同时为了保护电流互感器的安全运行,对于电流互感器为了不增加二次负担,采用穿芯的形式进行安装。

电压信号则取自盘柜内部自身的电压互感器。由于该采集单元的输出是RS232串口的通信方式,为了保障电压、电流数据在传输过程中的抗干扰性和快速性,系统采用一个RS232转光纤的设备,系统通信方式为光纤通信。

(2) 局部放电传感器

近年来,超声波技术检测变压器局部放电被大力的推广,其特点是抗干扰能力较强,使用方

便。可以在变压器运行中或耐压试验时检测到局部放电。因此，本系统采用空气式超声波传感器。同时为了降低传感器所受方向性以及角度等方面的影响，准确对其内部放电点进行定位。该传感器在进行封装的时候做成旋转探头形式，其定位精度20 cm（局部放电 >50 pC）。

本系统在变压器上共安装8个局部放电传感器，分别布置在变压器箱体的顶部和周围壳体上。该8个传感器的信号线引至下位机，下位机对信号的处理后传到上位机为系统判断变压器运行状态提供实时数据。

（3）温湿度传感器

干式变压器的安全运行和使用寿命，很大程度上取决于变压器绕组绝缘的安全可靠。绕组温度超过绝缘耐受温度使绝缘破坏，是导致变压器不能正常工作的主要原因之一。因此对变压器的运行温度的监测及其报警控制是十分重要的。在线监测系统的变压器温湿度数据通过数据线传至下位机，下位机通过初级的数据处理将处理好的信号通过光纤上传至上位机。并实际应用过程中通过设定相应的温湿度报警值，来提示运行人员变压器运行情况。

（4）振动传感器

为了监测平台晃动和运行过程中变压器松动等异常现象时对变压器的影响，因此在变压器本体下部加装振动监测单元。此单元可以实现在线显示变压器在运行过程中振动的幅值和加速度等情况，并自动保存振动历史数据。同时设定一定的报警值，当传感器测量到振动值大于报警值，系统发出报警信号提示运行人员检查变压器状态。

（5）下位机

为了满足对变压器局部放电、温湿度、振动等信号的快速处理，减小传输过程中的数据损失和干扰，在变压器间就近安装一台下位机。下位机将上述数据进行处理后通过光纤传至上位机。同时安装一台UPS为下位机和各种传感器监测单元提供电源。

（6）上位机

上位机是整个在线监测系统的“大脑”，通过变压器后台监测、局放放电信号故障定位计算等软件的开发和应用，对数据信号进行处理、变压器故障预警及故障定位。不仅为运行人员提供各种运行数据和可靠、准确的故障信息，而且通过变压器监测与故障信息数据库，掌握变压器整

个运行生命周期内相关数据。

具体功能如下。

1) 对变压器内部局部放电和外部放电进行综合监测，并进行有效定位。

2) 对变压器的电压、电流及负荷情况进行实时监测。

3) 对变压器的振动信息、热点温度及变压器箱体顶层温湿度进行实时监测。

4) 根据局部放电、电压电流和振动情况等信息对变压器状态进行综合评价并及时报警。

5) 对历史数据及历史报警记录可进行查询、浏览等基本操作。

该在线监测系统采用局部放电和温度监测作为故障特征量进行故障综合定位和故障预警，尤其是采用非接触式局部放电监测方法，有效控制风险，监测及定位精确度高，定位精度可达到20 cm。另外，对干式变压器建立其典型预警模型，为其在线早期潜伏性故障进行早期预警，为变压器状态检修奠定技术基础。

系统应用价值

海上平台变压器在线监测系统，作为海上平台电力系统新技术，首次在锦州25-1南CEP平台应用，通过此系统的应用，实现对变压器内部局放、温湿度、振动等信息的实时监测，全天候为变压器进行体检，为变压器状态评估和预知性维修提供了有效的基础数据，也为海上平台操作人员提供了一套专业的维修工具，使得变压器发生异常情况时能够及时察觉，将隐患消除在故障初期，降低故障对变压器的损伤，从而降低故障带来的产量及经济损失。

此系统通过在平台上的应用，为平台变压器的管理增加了新的手段，其他作业区看到此应用效果后，也陆续增加此监测系统，目前此系统已覆盖近30个平台，为将来打造陆地电气设备评价中心打下基础。

结束语

变压器在线监测系统的成功实施，丰富了海上平台变压器的监测手段，与平台现有的继电保护、EMS等监控设备相结合，共同为海上平台电力系统的稳定运行保驾护航。EA

（收稿日期：2015.10.22）

（编辑：杨得润）