

[干式变压器]

海油平台干式变压器冷却系统可靠性研究

文/王鹏 郑高意 赵上进 莫金邓
中海石油（中国）有限公司曹妃甸作业公司

随着海洋石油的不断发展和开采活动的不断深入，海油平台运行的稳定性和安全性显得尤为重要。平台电力系统的稳定运行直接关系到整个平台的安全与效率。干式变压器作为海油平台电力系统中不可或缺的电气设备，其冷却系统的可靠性直接影响到变压器的运行。对海油平台干式变压器冷却系统的可靠性进行研究，分析其影响因素，提出对应的改进措施，以提高冷却系统的可靠性，从而提高干式变压器的稳定性和使用寿命。

海油平台是海洋石油开采的重要设施，其电力系统是保证平台正常运行的关键。早期的电力来源由海上电站平台的原油主机和燃气透平机组提供。2021年，为响应国家节能减排和绿色低碳发展战略，渤海油田通过岸电项目的顺利开展，不仅解决了国外透平机组“卡脖子”的技术难题，还为海上油田设施提供了稳定的电力供应，极大限度减少了电网因发电机故障跳机引发电网溃网的次数。输电时，要求高压输电，需要升压变压器，以减少线路压降和功率损耗。用户需要低压用电，需要降压变压器，以求安全和低成本，两种变压器在输配电网中应用广泛^[1]。因此，变压器稳定运行是电网安全运行的基本保障^[2]，而干式变压器由于其不漏油、维护成本低等优点，在海上电力系统中得到广泛应用，是海上油田电力系统中的重要组成部分。变压器在运行过程中，一次侧、二次侧绕组会产生损耗，称为铜损；变压器铁心也会产生损耗，称为铁损^[3]。变压器产生大量的热能，若不能及时有效散热，会降低其带负载能力，加速变压器元器件和绝缘材料的老化，影响使用寿命^[4]。然而，由于海洋环境的特殊性，干式变压器在运行过程中面临着诸多挑战，冷却系统的可靠性成为保障干式变压器乃

至整个电力系统稳定运行的关键因素。因此，对海油平台干式变压器冷却系统的可靠性进行研究，具有重要的现实意义和工程应用价值。

干式变压器冷却系统概述

变压器的分类方式多种多样，按冷却方式可分为干式变压器和油浸式变压器，干式变压器是指铁心和绕组不浸渍在绝缘油中的变压器，其冷却方式主要依赖于空气对流。由于不使用油作为冷却介质，因此无需担心油泄漏或火灾风险，特别适用于对安全要求较高的场所。因此，干式变压器广泛应用于海洋石油行业。

干式变压器主要发挥的是空气对流的作用，逐步实现变压器的冷却^[5]。根据冷却方式的不同，干式变压器可分为自然空气冷却（AN）和强迫空气冷却（AF）两种^[6]。自然空气冷却时，变压器可在额定容量下长期连续运行。而强迫空气冷却时，通过增加风机等设备，提高空气流速，增强散热效果。大量的研究数据表明，变压器的运行温度在很大程度上影响着负载损耗，降低变压器的运行温度可以有效地减少负载损耗^[7]。在变压器常见故障中，冷却器故障频繁发生，占到了总故障的

70%~80%^[8]。冷却系统的设计合理性直接影响到其可靠性,不合理的设计可能导致散热效果不佳、能耗增加和维护困难等问题。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的安全性和可靠性。而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。

干式变压器冷却系统异常

某海洋石油平台共有2台35 kV/10.5 kV高压变压器和5台35 kV/0.4 kV主变压器,位于下甲板高压变压器间和中层甲板主变压器间内,分别给平台中压10.5 kV配电盘和低压400 V配电盘供电。两个变压器间设计均未设置空调系统,都采用机械送风、机械排风的通风方式,送风机和排风机均为3台普通船用轴流风机,每台风机风量为23 000 m³/h,运行方式为2用1备。

1. 干式变压器温控器

2台高压变压器和5台主变压器,均采用LD-B10-C220YFI系列干式变压器温度控制器。该温控器是专为干式变压器安全运行设计的一种智能控制器,它采用单片机技术,利用预埋在干式变压器绕组中的铂热电阻来检测及显示变压器绕组的温升,能够自动启停冷却风机对绕组进行强迫风冷,避免或减少变压器因温度过高而引发的故障,并能控制超温报警及超温跳闸输出,以保证变压器运行在安全状态,从而延长变压器的工作寿命。

该温控器具有良好的扩展性,可根据用户需求扩展多组控制输出接点(如两组超温报警、两组超温跳闸输出),也可根据用户需求将无源控制输出接点容量设计至DC 220 V 5 A。温控器采用的铂热电阻是一种在-30.0~240.0℃范围内线性较好的热电阻,它符合GB/T 8622—1997《工业铂电阻技术条件及分度表》B级要求,尺寸大小为Φ4 mm×40 mm,广泛应用于变压器温度监控装置。

当温控器故障后主要造成以下几点影响:

- 1) 变压器绕组温度无法实时监测,不能确定变压器绕组温度是否正常。
- 2) 无法实现冷却风机自动起停对绕组进行强迫风冷,给变压器散热。
- 3) 温度无法监测,导致变压器高温报警功能失

效,不能及时提醒值班人员变压器处于高温状态。

4) 温度无法监测,导致变压器超温跳闸保护失效,若变压器长期超温运行,会加速内部绝缘材料老化,缩短变压器寿命。

2. 干式变压器温控器冷却系统异常案例

某海洋石油平台配置的2台35 kV/10.5 kV, 10 000 kV·A高压变压器为并列运行方式,为平台注水泵、注水增压泵和海水提升泵等中压负荷供电,正常工况下负荷为12.5 MW,两台变压器分别带载6.3 MW左右。电气人员巡检时发现高压变压器TR-002的温控器无显示,TR-001的温控器显示绕组温度平均93℃,横流风机为运行状态。由此推断TR-002变压器绕组温度也超过85℃,风机也应为启动状态,但温控器无显示。打开控制盒后发现内部风机起停接触器也未动作,风机不能运行,如不及时处理,将导致变压器绕组持续高温,不但影响变压器正常运行,还影响变压器寿命。

目前所带负荷超过一台变压器额定容量,一旦TR-002变压器因超温跳闸信号误动作,将会使平台中压设备甩负荷,影响平台设备正常运行。为保证变压器上口断路器不因温控器误发跳闸信号而动作,现场根据变压器上口高压盘图样,超温跳闸信号和综合保护跳闸信号并联,通过2XB短接片连接XJ继电器,再通过XJ继电器的常开点连接到分闸线圈回路,完成超温跳闸功能。为了检修温控器,把变压器上口断路器二次回路中与超温跳闸信号串联的2XB短接片打开,使超温跳闸信号失效,然后对温控器进行检修。

现场测量220 V电源正常,内部电源模块指示灯也正常,初步判断为内部电源板故障。更换温控器电源板后,测试温控器工作正常,并测量温控器没有超温跳闸信号输出,遂将2XB短接片恢复,完成此次温控器检修工作。由此可见,冷却系统是干式变压器的重要组成部分,并且对电力系统的正常运行有着直接影响^[9]。

干式变压器冷却系统可靠性提升策略

高压变压器为平台关键的配电设备,为避免上述情况再次发生,使变压器冷却系统失效,最大化保证变压器稳定运行。平台电气班组通过分析讨论,制定以下三条干式变压器冷却系统可靠性提升

策略，下面分别进行介绍。

1. 干式变压器冷却系统预防性试验

干式变压器冷却系统分为测温元件、控制系统、执行元件三部分。为了避免干式变压器冷却系统故障带来的安全隐患，需要采取一定的预防性试验项目。根据《DL/T 596—2021电力设备预防性维护规程》要求，在变压器A、B级检修后，或变压器投入运行 ≤ 6 年时，或必要时要对变压器测温装置及二次回路进行预防性试验，旨在确保测温装置能够指示正确，测温电阻值应和出厂值相符，二次回路的绝缘电阻不低于 $1\text{ M}\Omega$ 。还要对控制系统的输出信号进行测试，通过现场模拟，确保输出的故障信号、报警信号和跳闸信号能够可靠动作。

除此之外，还要对干式变压器冷却系统的执行元件进行预防性试验，例如变压器内安装的横流式冷却风机。因为大容量的干式变压器常采用强迫风冷方式进行冷却，如果测温元件、控制系统均正常，而冷却风机无法运行，将会导致整个冷却系统瘫痪，无法实现自动控制。试验项目包括但不限于以下内容：风机运行是否有异响、风机电机绝缘直阻是否正常、风机机械结构是否有磨损以及风机电源线绝缘是否老化等。因此，横流式冷却风机的可靠运行，对干式变压器冷却系统至关重要。

2. 干式变压器温控器冗余改造

为提高温控器运行的可靠性，平台对温控器进行冗余改造，给变压器再加装一套温控器和温度探头，并对温控器控制回路进行改造，以此来提高变压器温控器的可靠性。

改造方法如下：

1) 在变压器外壳上开孔，开孔尺寸为 $370\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ （高 $\times$ 宽）。

2) 嵌入安装温控器，并在高低压侧绕组上原温控器铂热电阻附近各加装1个铂热电阻，和原铂热电阻共同监测相近位置的变压器绕组温度。

3) 将新加温控器的输出信号与原温控器的输出信号进行串联和并联改造，提高温控器运行的可靠性，改造原理图如图1所示。

图1中，风机启动信号1为原温控器输出信号，风机启动信号2为新加温控器输出信号， K_0 为高压侧横流风机启停接触器， K_1 为低压侧横流风机启停接触器。超温跳闸信号1和2分别为新旧温控器监测

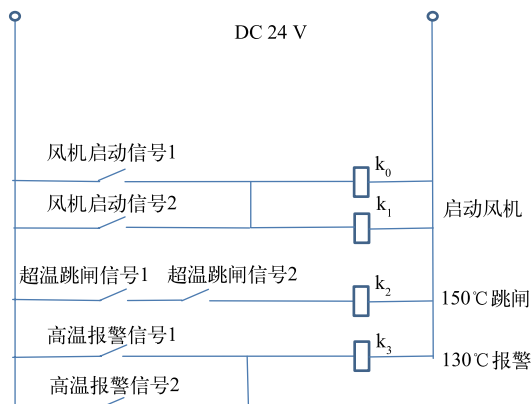


图1 温控器控制回路改造原理图

到绕组温度超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发出的动作信号，高温报警信号1和2分别为新旧温控器监测到绕组温度超过 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发出的信号。通过以上改造，最终达到以下目的：

1) 无论哪个温控器监测到绕组温度超过 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，发出风机启动信号时，均启动高压侧和低压侧轴流风机，给变压器降温。

2) 无论哪个温控器监测到绕组温度超过 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，发出高温报警信号时，都发出高温报警信号，提醒值班人员注意变压器状态，检查轴流风机是否异常。

3) 只有当两个温控器同时监测到绕组温度超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，发出超温跳闸信号时，超温跳闸继电器动作，发出跳闸给高压盘，使变压器上口VCB断路器跳闸。以此来避免因单个温控器监测到温度突变，超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，误发出跳闸信号，导致变压器跳闸，影响电气设备的稳定运行。

4) 能够有效避免干式变压器因一台温控器跳闸或故障之后，冷却系统无法正常运行。

3. 轴流冷却风机供电回路改造

目前，海洋石油平台上的干式变压器普遍采用横式轴流风机进行强制风冷，这种冷却方式不仅经济有效，还能大大延长变压器的使用寿命。横式轴流风机通过强制对流，加速变压器内部热量向外散发，从而维持变压器在较高负载下的稳定运行，其安装位置如图2所示。

一般在变压器的高压侧和低压侧各配备3台风机，共6台风机。由于受变压器温控器体积和成本影响，6台风机并不是由6个接触器来控制风机起停，普遍采用两个接触器控制6台风机，一个接触

器下口并联接入3台风机。这样当其中某一台风机堵转或接地，会使上口断路器跳闸，导致同回路的其他两台风机也无法正常运行。因此，就会出现变压器冷却效果不良和散热困难的问题，容易导致变压器过热^[10]。鉴于此类情况，平台电气人员对风机供电回路进行改造，在每台风机上口串接两个熔断器，改造原理图如图3所示。



图2 变压器内部结构

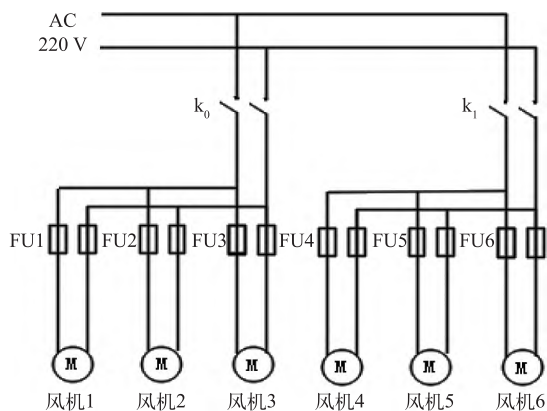


图3 风机控制回路改造原理图

因该平台已投产5年多，而且变压器负载率较高，已达85%左右，绕组温度超过85℃，内部横流风机长期运转，之前出现过1次单台风机机械故障导致电机堵转，使风机上口电源开关跳闸的现象。改造完成后，有效避免因单台风机故障导致上口开关跳闸3次，同回路其他风机能够正常运转，达到了预期目标。

结束语

干式电力变压器在海洋石油平台输配电系统中应用比较广泛，其安全、可靠的运行对海洋石油平

台的产量提供保障。干式电力变压器因其自身损耗产生的热量无法避免，而干式变压器常见的故障大多因高温引起，因此，冷却系统的可靠运行显得尤为重要。通过对干式电力变压器冷却系统的各个环节进行研究，并利用变压器维保时进行相关改造，大幅提升干式变压器冷却系统的可靠性，为油田增储上产提供必要条件。

(收稿日期：2024-11-19)

参考文献

- [1] 张春丽, 王伟奇, 穆家祥, 等. 电力变压器油温智能控制系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(5): 189-191.
- [2] 惠所信, 鲍兆环. 变压器常见故障原因分析[J]. 农村电工, 2021, 29(3): 43-44.
- [3] 尹利秋. 萨北油田6 kV配电线路节能降耗研究[J]. 石油石化节能, 2023, 13(8): 102-106.
- [4] 洪序平, 卢鹤敏, 徐瀚, 等. 基于PLC的智能变压器冷却监控系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(9): 44-48.
- [5] 李鹏. 变压器冷却技术的发展现状及发展前景展望[J]. 科技创新与应用, 2020, (22): 155-156.
- [6] 张鲁, 李永光, 高向宗, 等. 变压器冷却技术的发展[J]. 能源与节能, 2016, (5): 109-110+119.
- [7] 王新程, 李永光, 王治源, 等. 变压器冷却方式的研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(3): 221-225.
- [8] 赵星伟, 袁峰. 风冷控制自投回路异常引发冷却器全停故障的分析与改进[J]. 大众用电, 2021, 36(1): 51-52.
- [9] 张文祥, 邹娟. 大型电力变压器冷却系统常见故障与技术改进[J]. 中国金属通报, 2019, (10): 220-221.
- [10] 陈明忠. 动车组牵引变压器冷却系统功率配置优化研究[J]. 变压器, 2020, 57(5): 40-43.