变压器真空有载分接开关常见故障原因分析

闫东亮[1],何向群[2]

(1. 包钢集团电气有限公司,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要:针对变压器真空有载分接开关运行稳定性对电力系统安全的关键影响,文章系统分析了变压器真空有载分接开关常见故障原因,并深入探讨了其运行可靠提升措施。分析发现,有载分接开关的故障原因多种多样,通过优化设计与选型、规范安装与调试等措施可以延长设备的使用寿命,还能减少故障停机时间,提高电力系统的整体运行效率。文章旨在为电力运维人员提供全面的故障排查思路与有效的可靠性提升方案,以保障变压器真空有载分接开关稳定运行,提升电力系统整体供电可靠性。

关键词:变压器;真空有载分接开关;故障;运行提升
中图分类号:TM403.4 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0075 - 05

Cause Analysis on Common Faults for Vacuum On - load Tap Changer of Transformer

Yan Dongliang[1], *He Xiangqun*[2]

(1. *Baotou Steel Group Electric Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the causes of common faults for vacuum on - load tap changer of transformer are systematically analyzed and improvement measures for its reliable operations are deeply discussed aiming at the key effects of its operation stability on power system security. It is found by analysis that the causes of faults for on - load tap changer are various. The service life of equipment is increased, downtime is reduced and overall operating efficiency of power system is improved through such measures as optimization design and model selection as well as normalizing installation and commissioning. Moreover, it is aimed to provide the comprehensive troubleshooting ideas and effective improvement scheme of reliability for operation and maintenance staff of power to ensure the stable operations of vacuum on - load tap changer of transformer so that the reliability of bulk supply for power system is improved.

Key words: transformer; vacuum on - load tap changer; faults; operation improvement

变压器真空有载分接开关在电力系统中扮演着 极为关键的角色,能够在变压器运行状态下实现对

收稿日期:2025 - 07 - 02
作者简介:闫东亮(1982 -),男,内蒙古包头市人,工程师,现从事变压器生产和制造工作。

电压的调节,确保电力系统电压的稳定性与电能质量。运行环境复杂、操作频繁等多种因素,会造成变压器真空有载分接开关易出现各类故障,这些故障不仅会影响变压器自身的正常运行,还可能对整个电力系统的安全与稳定构成严重威胁。因此深入探究变压器真空有载分接开关常见故障原因并制定切实可行的运行可靠提升措施具有重大的现实意义。

1 常见故障原因分析

1.1 机械故障

在变压器真空有载分接开关频繁切换过程中,触头之间会产生机械摩擦。触头长期承受这种机械应力,其表面材料会逐渐磨损。当磨损程度达到一定值时,触头的接触电阻会显著增大[1]。触头表面的磨损可能导致其有效接触面积减小,根据电阻定律

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{1}$$

式中:R 为电阻,ρ 为电阻率,l 为导体长度,S 为导体横截面积。接触面积减小会使接触电阻 R 增大。过大的接触电阻会引起触头过热,进而影响分接开关的正常工作。图 1 为 CM 型有载分接开关图。



图 1 CM 型有载分接开关

分接开关的传动机构负责将操作命令转化为触头的实际动作。传动机构中的齿轮、链条、传动轴等部件在长期运行过程中,可能因疲劳、润滑不良等原因出现磨损、变形甚至断裂。齿轮的齿面磨损可能导致齿轮啮合不良,在传动过程中出现卡滞现象,使得分接开关无法准确完成切换动作,严重时甚至会导致整个传动系统失效。

分接开关中的弹簧用于提供触头闭合时所需的接触压力在切换过程中储存和释放能量。随着使用时间的增加,弹簧会受到疲劳应力的作用,其弹性系数会发生变化,导致弹簧性能劣化。弹簧弹性不足会使触头接触压力减小,从而增大接触电阻,引发过热故障;而弹簧弹性过大则可能在切换过程中产生过大的冲击力,对触头和其他部件造成损坏。

1.2 电气故障

分接选择器的触头系统采用笼式“外套内引”的套轴结构,主要由中心绝缘筒、绝缘板条、传动管、桥式触头以及上、下法兰等部件组成。其中,中心绝缘筒上装有接触环,绝缘板条上设有静触头,并通过上、下法兰环绕排列。此外,绝缘板条上还配备了单双数静触头和均压罩,以实现电场的均匀分布。静触头通过桥式触头与中心绝缘筒上的接触环相连,接触环的引线从中心绝缘筒引出,进一步与切换开关相连接。

分接选择器的桥式触头采用“山”字形的上下夹片式结构。两只主弹簧紧密固定在动触头上,桥式触头能够始终保持四点接触(见图 2),从而实现自动调节和有效冷却的功能。

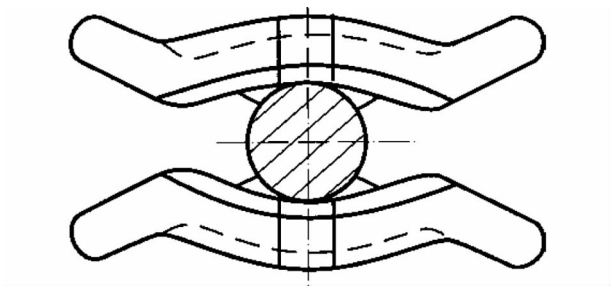


图 2 分接选择器触头的接触

触头表面还可能因氧化、积垢等原因形成一层不良导电膜。当有电流通过时,这层导电膜会增加接触电阻,导致触头发热。例如在含有一定湿度和腐蚀性气体的环境中运行时,触头表面更容易发生氧化反应,生成的氧化物会阻碍电流的传导。研究表明,在湿度超过 60% 且存在二氧化硫等腐蚀性气体的环境中,触头表面的氧化速率会增加 30% 以上,生成的氧化层厚度可达数微米。当分接开关长期处于高负荷运行状态时,触头表面的温度升高,会进一步加速氧化过程,使得接触电阻不断增大。例如,当触头温度从 50 ℃升高到 80 ℃时,氧化速率可能增加 1 倍以上,接触电阻可能增大 50% 以上,最

终引发触头烧蚀等严重故障。

分接选择器负责在不同的分接位置之间进行切换选择。其故障通常表现为选择器的动、静触头之间的接触不可靠。这可能是由于选择器的制造工艺缺陷,导致动、静触头的配合精度不足,在运行过程中容易出现接触不良。另外分接选择器的绝缘性能下降也是一个常见问题。绝缘材料在长期运行中会受到电场、热场以及环境因素的综合作用,其绝缘性能会逐渐降低。当绝缘电阻下降到一定程度时可能会发生绝缘击穿,引发相间短路等严重电气事故。

在变压器真空有载分接开关的切换过程中,过渡电阻起到限制切换电流的作用。过渡电阻长期承受大电流冲击,其电阻值可能会发生变化。例如过渡电阻的电阻丝可能因过热而熔断,或者因电阻材料的性能发生改变导致电阻值偏离设计值。电阻值的变化会影响分接开关切换过程中的电流限制效果。若电阻值过小,则无法有效限制切换电流,可能使触头承受过大的电流冲击而损坏;若电阻值过大,则会导致切换时间延长,影响分接开关的正常操作。

1.3　真空环境相关故障

变压器真空有载分接开关内部的真空环境对于保证其正常运行至关重要。真空度下降可能是由于密封件老化、损坏,导致空气或其他气体渗入分接开关内部。当真空度降低到一定程度时,触头间的绝缘性能会显著下降。根据气体放电理论,在低真空环境下,气体分子的密度增加,电子在电场作用下加速运动时更容易与气体分子发生碰撞,从而引发气体放电现象。这种放电会产生高温和强电场,对触头和其他部件造成损坏,严重时甚至会导致分接开关短路。

真空灭弧室是真空有载分接开关实现灭弧功能的关键部件。其故障主要表现为触头烧蚀、真空泡破裂等。当分接开关在切换时,触头间会产生电弧,真空灭弧室通过真空环境和特殊的触头结构来迅速熄灭电弧。如果真空灭弧室的制造质量存在问题,或者在长期运行过程中受到异常应力的作用,可能会导致触头烧蚀不均匀,影响灭弧效果[2]。

2　变压器真空有载分接开关运行可靠提升措施

2.1　优化设计与选型

在设计变压器真空有载分接开关的触头结构时,应充分考虑触头的机械强度、耐磨性以及接触性能。采用高强度、高导电率且具有良好耐磨性能的材料制造触头[3]。同时要通过优化触头的形状和尺寸,来增大触头的有效接触面积,降低接触电阻,例如曲面触头结构可使触头在接触时形成多点接触,提高接触的可靠性。此外,还可以在触头表面采用特殊的处理工艺,如镀银、镀镍等,以增强触头的抗腐蚀性能和导电性能。

在设计变压器真空有载分接开关时,也要对传动机构进行优化设计,选用高质量的齿轮、链条、传动轴等部件,并确保其制造精度和装配精度。通过合理设计传动比,使分接开关在切换过程中能够平稳、准确地动作。设计人员也要加强传动机构的润滑设计,为确保各传动部件在运行过程中始终处于良好的润滑状态,减少磨损和摩擦阻力,需要采用合适的润滑剂并设置有效的润滑系统。在选择变压器真空有载分接开关时,应根据实际的电力系统运行参数,合理选择分接开关的型号和规格。确保所选分接开关的额定电压、额定电流、额定切换容量等参数,能够满足实际运行需求并有一定的裕度。同时,要考虑分接开关的品牌、质量和售后服务等因素,优先选择具有良好口碑和成熟技术的产品,以保证分接开关的可靠性和稳定性。

2.2　规范安装与调试

在安装变压器真空有载分接开关时,必须严格按照厂家提供的安装说明书和相关的安装规程进行操作。安装中要注意对各部件的保护,避免受到碰撞和损伤。例如在安装触头和真空灭弧室等关键部件时,应采取严格的防尘、防潮措施,防止杂质和水分进入分接开关内部。

安装完成后,工作人员要对变压器真空有载分接开关进行全面细致的调试。调试内容包括分接开关的动作顺序、切换时间、触头接触电阻、真空度等参数的测试与调整。通过调试,确保分接开关的各项性能指标符合设计要求和相关标准。

在安装和调试过程中,要详细记录各项操作步骤、测试数据以及发现的问题和处理方法。这些记录将作为分接开关运行维护的重要依据,有助于在后续的运行过程中对分接开关的状态进行评估和分析。

2.3　加强运行维护

制定严格的定期巡检制度,安排专业的运维人员,对变压器真空有载分接开关进行定期检查。巡检内容包括分接开关的外观检查,查看是否有异常

变形、渗漏油等现象;检查分接开关的操作机构是否灵活,有无卡滞现象;测量触头的接触电阻、真空度等参数,并与历史数据进行对比分析。定期巡检能够及时发现分接开关运行过程中出现的早期故障迹象,以便采取有效的措施进行处理,避免故障的进一步发展[4]。

当巡检过程中,发现变压器真空有载分接开关存在问题时,应及时进行维护和检修。对于触头表面的轻微氧化、积垢等简单的故障,可以通过清洁触头表面、调整触头压紧力等方式进行处理。对于如触头磨损严重、传动机构部件损坏等严重故障,则需要进行更换部件或整体检修。

维修人员要对每次维护和检修工作进行详细记录,这些记录将有助于对分接开关的运行状况进行跟踪分析,总结故障发生的规律,为制定更加合理的维护计划提供依据。

2.4 控制运行环境

变压器真空有载分接开关应运行在适宜的温度和湿度环境中。过高的温度会加速分接开关内部部件的老化和绝缘性能下降,而过低的温度则可能导致某些部件的材料性能发生变化,影响其正常工作。同时,过高的湿度会使触头表面容易发生氧化和腐蚀,降低触头的接触性能。因此要采取有效的温度和湿度控制措施,如在分接开关安装场所设置空调、除湿机等设备,将环境温度控制在 -25 ℃ ~40 ℃间,相对湿度控制在60%以下[5]。

分接开关运行环境中的灰尘和腐蚀性气体也会对其性能产生不利影响。灰尘会积聚在触头表面和其他部件上,影响散热和绝缘性能,同时也可能导致触头接触不良。腐蚀性气体会与触头表面的金属材料发生化学反应,加速触头的腐蚀。为了防止灰尘和腐蚀性气体的侵害,应在分接开关的安装场所采取有效的防尘和防腐蚀措施。例如对分接开关进行密封安装,设置空气过滤装置,定期对安装场所进行清洁等。对于处于恶劣环境(如化工厂附近)的分接开关,还可以采用特殊的防腐材料制造分接开关的外壳和内部部件,提高其抗腐蚀能力。

在电力系统中,存在着各种电磁干扰源,这些电磁干扰可能会影响变压器真空有载分接开关的控制系统和信号传输,导致分接开关误动作或操作失灵。为了防止电磁干扰,应在分接开关的控制系统中采取有效的屏蔽、滤波等防护措施。同时合理布置分接开关的安装位置,尽量远离强电磁干扰源,减少电磁干扰对分接开关的影响。

2.5 建立完善的故障处理与经验总结机制

电力运维部门应制定完善的变压器真空有载分接开关故障应急预案。应急预案应包括故障发生后的应急处理流程、各部门和人员的职责分工、所需的应急物资和设备等内容。同时,要定期对应急预案进行演练,确保在实际故障发生时,运维人员能够迅速、准确地按照应急预案进行处理,最大限度地减少故障对电力系统的影响。

当变压器真空有载分接开关发生故障后,要组织专业人员对故障原因进行深入分析。通过对故障现象、运行记录、维护检修记录等多方面信息的综合分析,找出故障的根本原因。只有准确找出故障原因才能采取针对性的措施进行改进,防止类似故障再次发生。

将每次变压器真空有载分接开关故障处理的经验进行总结,形成书面报告,并在电力运维部门内部进行知识共享。通过分享故障处理经验,使其他运维人员能够从中吸取教训,提高对分接开关故障的认识和处理能力。同时,将故障处理过程中发现的问题反馈给分接开关的制造厂家,促使厂家对产品进行改进和优化。

3 案例分析——触头磨损故障

3.1 故障现象

某变电站一台 110 kV 变压器的真空有载分接开关在运行过程中,运维人员通过在线监测系统发现分接开关的触头温度异常升高,最高温度达到了90 ℃(正常运行温度一般不超过70 ℃)。同时在对分接开关进行定期巡检时,发现分接开关在切换过程中存在轻微的放电现象且切换声音异常。

3.2 诊断过程

运维人员使用专业的接触电阻测试仪对分接开关的触头接触电阻进行测量。测量结果显示触头接触电阻为200 μΩ(正常接触电阻应不超过100 μΩ),明显超出正常范围。对分接开关进行解体检查,发现触头表面存在明显的磨损痕迹,部分区域出现了凹坑和划痕。触头的磨损程度不均匀,其中负荷较重的几个触头磨损更为严重。查阅分接开关的运行记录,发现该变压器在过去一段时间内长期处于高负荷运行状态,负载电流经常接近或超过分接开关的额定电流。同时,分接开关的操作频繁程度较高,平均每天切换次数达到了10次以上。

综合以上测量和检查结果,诊断该分接开关的故障原因为长期高负荷运行以及频繁操作导致触头过度磨损,从而引起接触电阻增大,进而导致触头温度升高和放电现象。

3.3　处理方法

根据故障现象,工作人员采取了一系列的处理措施。作业人员根据分接开关的型号和规格,采购了相同型号的触头进行更换。更换触头时严格按照厂家的安装要求进行操作,确保触头安装正确,接触良好。更换完成后,使用接触电阻测试仪再次对触头接触电阻进行测量,测量结果为 80 μΩ,符合正常范围。

作业人员对变压器的运行方式进行了调整,合理分配负荷,避免变压器长期处于高负荷运行状态。同时,优化了分接开关的操作策略,减少不必要的切换操作,降低分接开关的操作频繁程度。此外,在分接开关更换触头并调整运行方式后,作业人员加强了对分接开关的在线监测和定期巡检,增加触头温度、接触电阻等参数的监测频率,实时掌握分接开关的运行状态。

4　结束语

变压器真空有载分接开关的运行可靠性提升是一个系统工程,需要设计、制造、安装、调试和运行维护等多环节的协同配合。未来,随着技术的不断进步和运行经验的不断积累,真空有载分接开关的运行可靠性将得到进一步提升,为电力系统的高效运行提供更加坚实的保障。

参　考　文　献

[1] 贾远温,彭锋. 真空有载分接开关主触头烧蚀研究[J]. 自动化应用,2024,65(18):112 – 114.

[2] 荣一鸣,孙佳佳,史宗谦,等. 真空有载分接开关中真空灭弧室触头合闸行为研究[J]. 高电压技术,2025,51(4):1969 – 1979.

[3] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(18):6893 – 6908.

[4] 金雷,罗维,周凯,等. 真空有载分接开关常见故障原因及运行可靠提升措施[J]. 变压器,2022,59(3):13 – 17.

[5] 胡鹏伟,何艳琪,杨俊波,等. 变压器真空有载分接开关运用与分析[J]. 电气技术与经济,2021(2):50 – 51.

(上接第 48 页)

3　结论

(1)热处理温度影响高碳钢轨的组织形成,当热处理温度为 630 ℃时,珠光体组织外部有沿晶网状渗碳体析出。当热处理温度为 600 ℃时,显微组织为珠光体组织,且未出现沿晶网状渗碳体及碳化物颗粒。当热处理温度为 570 ℃时,珠光体组织中有碳化物颗粒。

(2)热处理温度对珠光体晶粒大小有一定的影响,热处理温度为 630 ℃时,珠光体晶粒较大。热处理温度为 600 ℃和 570 ℃时,珠光体晶粒较小。热处理温度在 630 ~ 570 ℃范围内时,珠光体片层间距的变化不大,珠光体片层间距分布在 0 ~ 300 nm 之间。

参　考　文　献

[1] 刘宗昌,任慧平,计云萍. 固态相变原理新论[M]. 北京:科学出版社,2005.

[2] Li Zhao Dong. Nuclention of austenite from pearlitic structure in an Fe – 0.6C – 1Cr alloy[J]. Metallurgical&Materials Transactions A, 2011, 42(6):1586 – 1596.

[3] 刘宗昌. 过冷奥氏体扩散型相变[M]. 北京:科学出版社,2007.

[4] 李昭东,宫本吾郎,杨志刚,等. Mn 和 Si 对 Fe – 0.6C钢中珠光体 – 奥氏体相变的影响[J]. 金属学报,2010,46(9):1066 – 1074.

[5] 崔桂彬,鞠新华,孟杨,等. 钢中珠光体球团尺寸的 EBSD 表征技术[J]. 金属热处理,2019,44(1):223 – 228.