

牵引变压器故障机理及故障特征研究分析

李长擎

中国铁路设计集团有限公司 电化电信院 天津 300000

摘要: 随着高速铁路的飞速发展,对牵引供电系统的可靠性要求也越来越高。牵引变压器作为牵引供电系统的核心设备,其可靠性影响着整个供电系统的安全运行,因此有必要对牵引变压器的故障机理及故障特征进行充分研究,进而为牵引变压器的故障诊断提供充分的依据,为整个铁路牵引供电系统的安全平稳运行提供保障。

关键词: 牵引变压器 过热性故障; 放电性故障

引言

牵引变压器其故障类型可以大致分为放电故障和过热故障。牵引变压器油中溶解气体^[1-2]是其故障的征兆,其中放电故障主要影响气体为氢气和乙炔,次要影响气体为甲烷,乙烷和乙烯。而过热故障主要影响气体为甲烷和乙烯,次要影响气体为氢气和乙炔。因此,分析牵引变压器油中溶解气体生成原理及其含量特征对于牵引变压器故障诊断有重要作用^[3]。

牵引变压器油中溶解气体主要有两个来源:变压器油分解和固体绝缘材料分解。

(1) 变压器油分解: 变压器油的主要成分是烷烃,环烷族饱和烃,芳香族不饱和和烃等化合物。在放电故障或者过热故障的作用下,化学键C-H键和C-C键断裂或合并,CH₃、CH₂和CH等化学基团通过复杂的化学反应迅速合成氢气和低分子烃类气体。

(2) 固体绝缘材料分解: 固体绝缘材料属于纤维绝缘材料,主要为纸、木块和层压板等,纤维素的主要是由多葡萄糖单体组成的长链状高聚合碳氢化合物(C₆H₁₀O₅),其中的C-O键的热稳定性比C-H键更弱,高于105℃时聚合物就会破裂,高于300℃时就会完全裂解和碳化。聚合物裂解生成大量CO和CO₂、少量低分子烃类气体,以及糠醛及其系列化合物。

下面从牵引变压器几种具体的故障机理和表征进行分析说明。

1 牵引变压器过热性故障

变压器内部局部过热不同于变压器在正常运行情况下的发热现象,当变压器正常运行时,变压器所产生的热量主要来源于绕组和铁芯,这些热量可以使油温升高,但上层油温一般不会超过85℃。而过热性故障是由于一些不正常因素引起的发热现象,并且使得局部温度超过正常运行温度,根据故障温度的不同,又可以分为低温

过热($t < 300^\circ\text{C}$)、中温过热($300 < t < 600^\circ\text{C}$)以及高温过热($t > 700^\circ\text{C}$)。过热性故障通常会从低温过热发展成为高温过热,过高的温度会使变压器油以及固体绝缘材料产生劣化,并且受热分解,从而会产生故障气体。有时过热性故障甚至会迅速发展为电弧性热点,从而对设备造成损坏,严重时甚至是永久性损坏。

(1) 故障原因

接触不良、导体故障、磁路故障等都会引起过热性故障,主要有:分接开关接触不良、漏磁环流、铁芯多点接地和硅胶进入本体导致局部油路堵塞等。

(2) 特征量及其变化规律

A. 产气特征

当故障点是裸金属过热时,温度升高而使得变压器油分解产气,其中CH₄和C₂H₄占总烃类比重最大,约为总烃类的80%。温度较低时,CH₄占比较大;温度超过500℃时,H₂和C₂H₄急剧增加,但H₂一般占比不超过30%,而C₂H₄占比将超过CH₄。低温过热时一般不产生C₂H₂,随着温度的升高,C₂H₂逐渐产生,当温度超过800℃时,变压器油中的C₂H₂明显增加。在过热性故障中,C₂H₆含量不高。当涉及固体绝缘材料时,还会产生较多的CO和CO₂气体,当固体绝缘材料开始热解时,主要产生的是CO₂,CO的含量随着温度的升高而增加,慢慢超过CO₂的含量。

B. 绕组温度

变压器发生过热故障时,绕组温度会超过其最热点温度98℃,对于A级绝缘变压器,温度每增加6℃,绝缘老化速度增加一倍,变压器工作寿命减少一半。

(3) 过热性故障特点

过热性故障有中等水平的能量密度,通过热效应造成绝缘介质加速劣化,它的主要特征可以通过总烃反映出来。通常过热性故障发展较为缓慢,不会很快引发设

备运行隐患,影响安全运行,但如果不及时处理,有可能导致设备严重损坏。

2 牵引变压器放电性故障

2.1 局部放电

变压器在电场的作用下,其内部的绝缘结构发生的非贯穿性放电现象,称为局部放电。一般因纸或纸板等绝缘介质中存在有空穴、漆瘤等材料缺陷所引起的油中气泡放电,其放电电场强度高,放电量大,可达 $10^3\sim 10^7\text{pC}$,放电波形持续时间可达 $10\mu\text{s}$ 数量级。由油和纸分解产生的气体,累计产生的气泡局部放电,放电量可达 10^5pC 。每一次局部放电都发生正负电荷中和,伴随有一个陡的电流脉冲,并向四周辐射电磁波,此外,局放过程中还会产生超声波、光、以及引起局部过热,并生成一些 H_2 、 C_2H_2 等化学物质。

(1) 故障原因

油浸式变压器在制造过程中可能存在浸漆、干燥和真空处理不彻底等缺陷,这样不可避免地会形成一些空腔,当绝缘油不能完全进入空腔时,空腔内就会存留气泡(气隙),且当变压器油本身存在质量不好或者注入变压器时处理不当,这时变压器中的绝缘油内部也会存留有气泡(气隙),由于气体比绝缘材料的介电系数小,所以气泡在交流电场下所承受的场强比绝缘材料所承受的场强度高,当气泡(气隙)所承受的场强超过了它的耐压程度,这些气泡(气隙)就会首先发生发电。另外,由于制造质量的原因,金属部件或导线出存在的尖角、漆瘤等,这些场强集中或过高的位置也容易发生局部放电。

(2) 特征量及其变化规律

A. 产气特征

设备内部的产气特征随放电能量密度不同而不同,当能量密度在 10^{-9} 以下时,一般总烃不高, H_2 是主要成分,氢烃总量的含量中有 $80\%\sim 90\%$ 是 H_2 ,其次是 CH_4 ,约占烃总量的 90% 以上;当放电能量密度为 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{C}$ 时,有 C_2H_2 产生, H_2 含量减少,但 C_2H_2 这时在总烃中所占的比例往往不到 2% 。

B. 特高频的产生

变压器发生局部放电时,放电时间持续很短,大约 $10\text{ns}\sim 100\text{ns}$ 。放电脉冲时间则更短,仅为 $0.35\text{ns}\sim 3\text{ns}$,脉宽 $1\text{ns}\sim 5\text{ns}$ 。所以局部放电产生的脉冲信号的频带是很宽的,应在数十到数百MHz。

C. 脉冲电流的产生

在放电形成过程中,导电通道以极快的速度构成,而由于导电粒子很快聚集所产生的反电动势使得导电通

道很快被中断,在极短的时间内进行的电荷转移,形成了具有丰富高频分量的放电电流脉冲。

D. 超声波的产生

电流会击穿介质,分解绝缘材料,产生异响,形成声波。

E. 局部放电的特点

局部放电的能量小于火花放电,并且产气组分也与火花放电不同,主要的特征故障气体是 H_2 和 CH_4 ,这是明显区别于其他放电性故障的特征。由于局部放电通常在小范围的局部空间内分散发生,因此往往不会立即形成贯穿通道,但局部放电会使得固体绝缘材料产生脆化、碳化等不可逆的损伤,长期故障会分解破坏电介质,严重时也会导致击穿的发生。

2.2 火花放电故障

火花放电是一种低能量放电,同时也是一种间歇性的放电。由于气体击穿后突然由绝缘体变为良导体,电流猛增,而电源功率不够,因此电压下降,放电暂时熄灭,待电压恢复再次放电。火花放电具有间歇性。

(1) 故障原因

在电场强度极不均匀或者放生畸变的感应电位下,不同电位的导体之间、绝缘体之间以及不固定的悬浮体都会存在悬浮电位,具有悬浮电位的部件往往场强较为集中,容易发生放电现象而烧坏周围的绝缘物质。当变压器油中存在杂质(水和纤维)时,由于它们的介电系数很大,很容易在电场的作用下发生极化,同时,由于它们的电导也比较大,就会使流过它们的泄漏电流增大,从而使温度升高,水发生汽化,油受热分解,同时形成气泡,在电场的作用下气泡被电极贯穿,火花放电在气泡通道中发生。

(2) 特征量及其变化规律

A. 产气特征

当变压器内部发生火花放电时,纯变压器油中分解出的故障气体以 C_2H_2 和 H_2 为主,还有部分 CH_4 和 C_2H_4 由于放点能量小,所以总烃含量一般不会太高,产生的 H_2 和 C_2H_2 的量也会低于电弧放电产生的 H_2 和 C_2H_2 的量。油中溶解的总烃量的 $25\%\sim 90\%$ 是 C_2H_2 , H_2 含量可占总氢烃量的 30% 以上。当有固体绝缘材料时,也会产生 CO 和 CO_2 气体。

B. 光和声的产生

火花放电时,高电压电极间的气体被击穿时,出现闪光和爆裂声的气体放电现象,碰撞电离并不发生在整个区域内,只是沿着狭窄曲折的发光通道进行,并伴随

着爆裂声。

C. 火花放电的特点

火花放电的能量小于电弧放电, 虽然与电弧放电的产气组分类似, 但产气量与产气速率明显低于电弧放电。通常, 火花放电不会很快引起绝缘击穿, 通常在油色谱分析结果异常可以反映出。

2.3 电弧放电故障

电弧放电是一种高能量放电, 通常以电子崩的形式冲击电介质, 破坏绝缘介质, 或使金属材料变形、融化、烧毁, 严重时可对设备造成损坏, 甚至发生爆炸事故。电弧放电常见的是由于线圈匝层之间击穿, 过电压引起内部闪络, 分接开关飞弧等故障类型。

(1) 故障原因

在变压器内部, 电弧放电主要发生在接头之间、绕组和铁芯之间、套管和箱体之间的短路, 由于电弧放电是能量密度大, 绝缘介质产气量大, 多数没有征兆, 不易预测, 最终容易以如瓦斯继电器动作跳闸等突发性事故暴露出来, 危害巨大。

(2) 产气特征

当变压器内部发生电弧放电故障时, 油中溶解的故障特征气体主要是 C_2H_2 、 H_2 , 其次是大量的 C_2H_4 、 CH_4 。由于电弧放电故障速度发展很快, 往往气体还来不及溶解于油中就释放到气体继电器内, 因此油中溶解气体组分含量往往与故障点位置、油流速度和故障持续时间有很大关系。在变压器内部发生电弧放电时, 一般 C_2H_2 占总烃20%~70%, H_2 占氢气的30%~90%, 绝大多数情况下 C_2H_2 高于 CH_4 , 在涉及固体绝缘时, 瓦斯气体和油中气体的CO含量较高。当油中气体组分中 C_2H_2 含量占主要成分且超标时, 很可能是变压器绕组短路或分接开关切换产生弧光放电所致; 如果其他成分没有超标, 而 C_2H_2 超标且增长速率较快, 则可能是变压器内部存在高能量放电故障。在固体材料中发生高能量的电弧放电, 产生CO和 CO_2 。

(3) 电弧放电的特点

电弧放电故障几乎可以瞬间摧毁设备。这类故障大多具有突发性, 故障时间较短, 难以事先发现, 通常是由于气体继电器动作, 然后取样分析, 从而对设备的故障类型和故障程度进行判断。

2.4 铁芯多点接地故障

(1) 铁芯多点接地的原因

穿心螺栓的螺孔若开孔不正, 穿螺栓时铁心硅钢片受外力作用, 靠外边的硅钢片就会向外膨胀, 并进入套

座内与套管相接; 夹件槽钢套座孔开的过大或者套座不合格, 组装套座后歪斜, 进入夹件槽钢孔内, 与铁心凸起的边片相接; 上夹件槽钢与变压器油箱顶盖加强铁相接触; 变压器油箱与铁心有定位钉时, 在变压器投入运行前必须把上部定位钉与定位螺孔分开; 下扼铁的夹件托板如果与铁心相碰也可能引起铁心多点接地。

(2) 铁芯多点接地后出现的异常现象

A. 铁芯电流: 随着变压器铁芯在内部形成回路, 铁芯中会产生涡流, 铁损会增加, 电流值会由原来的毫安级上升至安培级。长时间的铁芯电流过大会引起铁芯局部温度升高, 使变压器的运行损耗增加。

B. 温度: 随着变压器内部温度的升高, 变压器油会在高温下分解为各种烃类气体, 气体溶解在绝缘油中, 可能会形成气泡放电, 造成绝缘油性能下降。

2.5 绕组温度

(1) 绕组异常发热

A. 绕组异常发热原因

a. 短路故障电流冲击

电力变压器在运行过程中, 如遇上短路故障电流冲击, 特别是变压器出口或近距离故障, 巨大的短路冲击电流将使变压器绕组受到很大的电动力(是正常运行时的数十倍至数百倍), 并使绕组急剧发热。在较高的温度下, 导线的机械强度变小, 电动力更容易时绕组破坏或变形。

b. 在运输或安装过程中受到冲撞

在长途运输或安装过程中, 变压器可能会受到意外的冲撞、颠簸和振动等, 导致绕组发生变形。

c. 保护区有死区, 动作失灵

目前, 电网的保护系统存在死区或动作失灵都会导致变压器承受稳定短路电流作用的时间长。也是造成绕组变形事故的原因之一。

d. 绕组承受短路能力不够

(2) 绕组异常发热的危害

A. 绝缘距离发生变化, 或固体绝缘受到损伤, 导致局部放电发生。当遇到过电压作用时, 绕组便有可能发生饼间或铁心放电击穿事故, 即使在正常运行电压下, 因局部放电的长期作用, 绝缘损伤部位逐渐扩大, 最终导致变压器发生绝缘击穿事故。

B. 绕组机械性能下降, 当再次遭受到短路电流冲击时, 将承受不住巨大的冲击电动力的作用而发生损坏事故。

C. 累积效应。运行经验表明, 运行变压器一旦发生绕组变形, 将导致累积效应。

(3) 绕组过热

由于绕组自身结构属于非线性系统,各种损耗积聚的热量以及散热结构上的可能缺陷,决定了其温度分布并不均匀,绕组的局部过热,将直接影响变压器的寿命与安全运行。

A. 绕组过热的原因

a. 对于带有统包绝缘的换位导线绕制的变压器,由于其绕组制造工艺不成熟,在长期运行中会逐渐出现统包绝缘膨胀、段间油道堵塞和油流不畅等问题,这会使匝绝缘得不到及时冷却而逐渐老化,最终变脆脱落,造成局部露铜,形成匝间短路,导致变压器烧损事故。

b. 由于变压器绕组的主磁通和漏磁通沿着绕组的径向方向上的风量变化复杂,而引起涡流损耗分布不均匀,并在绕组端部达到最大,在大容量变压器中,由于漏磁密度高,形成的杂散损耗很大,从而导致过热。

c. 由于绕组的换位不合理,导致漏磁场在绕组各并联导体上的感应电势不同,在各并联导体上产生环流,环流和工作电流在一部分导体中叠加而引起过热。

B. 绕组温度与绝缘寿命的关系^[4]

绕组热点温度作为影响绕组绝缘能力的最关键因素,二者之间满足典型的6℃法则,标定运行在98℃时的变

压器的寿命为正常使用寿命,老化率为1。在80~140℃的温度区间,变压器绝缘所遭受的温度每上升6℃,其老化率增倍而寿命减半,每下降6℃变压器老化率减半而寿命增倍。一旦绕组热点温度超过140℃将危及变压器的正常运行。

4 结语

本文重点分析了牵引变压器过热性故障与放电性故障的机理,以及油气形成机理及其含量特征,为牵引变压器故障诊断提供理论支持,为整个铁路牵引供电系统的安全平稳运行提供保障。

参考文献:

[1]. 宿冲,周利军,吴广宁,王洪亮.基于加权灰色关联度的牵引变压器绝缘故障诊断软件[J].电气应用,2007,26(3):29-33.

[2]. 武启燕.牵引变压器油色谱在线监测氢气超标问题分析[J].电气化铁道,2017,28(z1):218-220.

[3]. 吕玉恒.牵引变压器绝缘在线监测技术应用研究[J].电工技术,2016(1):35-37.

[4]. 杨丽君.变压器油脂绝缘老化特征量与寿命评估方法研究[D].南京:南京理工大学,2010.