

运用检修

电力机车干式高压电压互感器
故障分析及预防措施

邓木生,王 强,李华柏,谢永超

(湖南铁道职业技术学院 轨道交通系,湖南 株洲 412001)

摘 要:针对应用于某型电力机车高压电压互感器在段频繁发生的烧损故障,分析故障产生的原因并提出相应的预防措施,以提高高压电压互感器运行的可靠性和稳定性。

关键词:电力机车;高压电压互感器;故障分析;电位梯度

中图分类号:TM451;U269.6 文献标识码:B
文章编号:1000-128X(2011)02-0063-04

高压电压互感器是机车车顶高压电器设备,主要实现接触网电压测量、功率计量和保护功能。目前,运用于机车上的高压电压互感器主要有油浸式高压电压互感器和干式高压电压互感器。某型交流传动电力机车上的高压电压互感器是树脂浇注型干式互感器,这是随着有机材料的涌现而开发出的一种新材料电压互感器,但安装在机车车顶长期处在多变环境下使用,可能导致烧损、开裂甚至爆炸。现对高压电压互感器运行过程中产生的问题进行分析,提出相应的预防措施,以提高产品运行的可靠性和稳定性。

1 故障情况

某型电力机车所使用的干式高压电压互感器故障统计情况如表 1 所示。

表1 某型电力机车电压互感器故障统计

日期	高压电压互感器故障信息与特征
2009-12-29	互感器运行途中烧损炸裂
2010-03-12	互感器运行途中烧损炸裂
2010-08-02	互感器运行途中烧损,车顶冒烟,无网压
2010-08-03	过隧道分相后,互感器烧损,机车无网压
2010-08-20	网压大于 29kV,跳主断,互感器烧损

2 故障特征及原因分析

2.1 网压虚高的特征

为了找出高压电压互感器在烧损前存在的故障特征,整理近期发生故障的某机车高压电压互感器在烧损前机车运行的网压数据。互感器在下午时间 14:47 烧坏,故障情况如表 2 和表 3 所示。

表2 高压互感器烧损前网压情况

开始时间	持续时间	故障代码
14:13:04	3min03s	1199
14:16:32	4min16s	1199
14:20:59	16s	1199
14:22:09	2min59s	1199
14:25:11	42s	1200
14:25:56	3 min 06s	1199
14:29:05	21s	1200
14:29:29	2 min 28s	1199
14:32:00	4 min 00s	1199
14:36:03	1 min 41s	1200
14:38:03	04s	1199
14:38:11	3 min 09s	1199
14:41:23	2 min 03s	1200
14:43:54	13s	1200
14:46:36	4 min	1199
14:46:41	1 min 41s	1200

注:故障代码 1199 表示:28kV < 网压 < 29 kV;
故障代码 1200 表示:网压 > 29 kV

表3 高压互感器烧损前故障情况

时间段	故障代码 1199 频次	故障代码 1200 频次
09:00~10:00	0	0
10:00~11:00	1	0
11:00~12:00	1	0
12:00~13:00	1	0
13:00~14:00	3	2
14:00~14:46	13	8

分析以上的数据,可以看出当高压电压互感器在发生烧损故障前,故障代码 1199 和 1200 出现的频次急剧升高,出现连续的网压异常升高现象。

2.2 网压虚高的原因分析

高压电压互感器的工作原理与一般的变压器相同,仅在结构型式、所用材料、容量和误差范围等方面有所区别。高压电压互感器的一、二次侧电压关系为

$$V_1 : V_2 = N_1 : N_2$$

即
$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \tag{1}$$

式中: N_1 为一次侧线圈匝数; N_2 为二次侧线圈匝数; V_1 为一次侧线圈电压; V_2 为二次侧线圈电压。

机车用高压电压互感器具备检测机车运行网压数据的功能。当高压电压互感器一次侧部分线圈由于绝缘破损、击穿出现匝间短路时,部分线圈的短路使一次侧线圈的总匝数 N_1 减少。由式(1)可知,当 V_1 与 N_2 不变而 N_1 减少时, V_2 则增大,这时高压互感器仍具备检测功能,但此时高压互感器所反映的网压数据会比实际的网压要高。因此,在机车持续运行时,机车 CCU 和 TCU 所记录的网压数据虚高,表征为连续的网压异常和超高。因此出现了 HXD1B 型机车高压电压互感器在运行途中网压突然升至 34 kV 和自开车后一直出现高网压情况,高的时候达 45 kV 的现象。如果高压互感器已

收稿日期:2010-10-14

部分匝间或层间短路仍然继续运行,则会造成高压互感器的烧损甚至炸裂。

2.3 故障电压互感器的线圈结构与解剖分析

为了查找故障点的根源,解剖了一些故障电压互感器,该电压互感器高压线圈分为3段,如图1所示。线圈C段一共71层,每层158匝,C段绕完后接收尾层,收尾为1层,为25匝;线圈B段共70层,每层210匝;A段先绕1层起头,匝数为67,再绕线圈A段,A段一共70层,每层260匝。高压线圈采用3段分布的结构,每一段只处在额定电压的一部分电压下,可以分段绝缘,其绝缘可按每段的匝数进行分布,以节省绝缘材料,降低绝缘的等级。

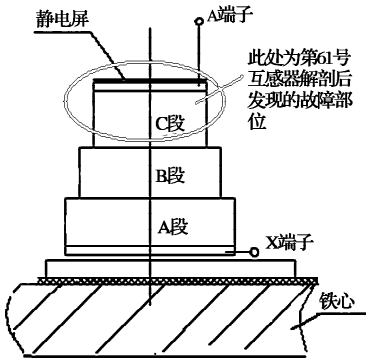


图1 高压电压互感器高压线圈分布示意图

故障电压互感器烧损情况及部位如表4所示,通过解剖,发现电压互感器高压线圈C段绝缘层烧毁的居多。

表4 故障电压互感器解剖图片

图片	故障现象描述
	标记处为故障局部，位于第一个伞裙下部，可见有大量黑色油状物凝固体
	标记处为浇注体炸裂裂缝，可见有黑色印记，由此可判断互感器伞裙外部的黑色油状物（该物质为高压线圈的绝缘材料遇高温熔化形成）由此处流出
	标记处为高压线圈C段绝缘层靠高压A端子处烧毁，静电屏外覆盖一层黑色碳化物，为绝缘层烧毁的残留物

2.4 高压互感器烧损故障的理论分析

机车高压电压互感器,通入高压线圈的有2类电压:其一为稳态电压,主要指正常情况下来自接触网

的工频交流额定电压;其二为暂态电压,主要是包括接触网线路的操作过电压、大气过电压以及特快速暂态电压。操作过电压是由于接触网线路上的开关拉合闸操作时,因系统中电磁能量振荡和积聚而产生的过电压,一般为额定电压的3.0~4.5倍。大气过电压是因输电线路被直接遭雷击或雷云放电时电磁场的剧烈变化所引起的过电压,一般为额定电压的8~12倍。暂态电压坡度陡,持续时间短,很容易通过保护装置进入高压线圈,由于电压远高于互感器的额定电压,作用于高压电压互感器对高压线圈的绝缘危害极大。实际运行经验表明,暂态电压使高压互感器绝缘损坏的比例占60%以上。

在工频激励电压的作用下,高压线圈的等值电路只包括集中电感与电阻,电压稳态分布由电阻与电感决定。当幅值为 U_0 的暂态过电压侵入高压线圈时,线圈的电感能量和电容能量发生交换而形成振荡过程,使线圈匝间、层间电位差和线圈各层对地电位比工频电压作用下增大许多倍,所以暂态电压下电压互感器高压线圈的等值电路必须考虑匝间、层间电容和对地电容。当暂态电压瞬时作用于高压线圈时,暂态电压起始时刻坡度陡,频率高,属于高频冲击,此时绕组电感相当于开路,电压沿绕组的分布基本由电容决定,这时电压沿高压线圈的分布称为起始电压分布。暂态电压瞬时作用于互感器时,忽略绕组电阻的高压线圈等值电路如图2所示^[4]。

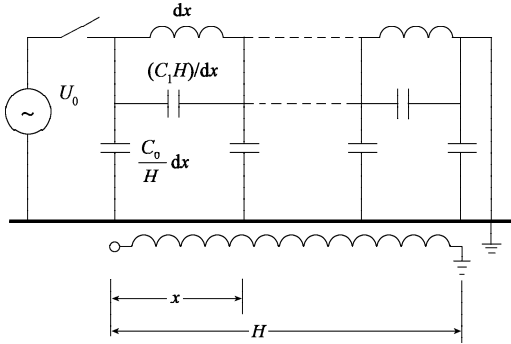


图2 电压互感器高压线圈暂态电压简化等值电路

图中 dx 为高压线圈单位绕组的高度。设高压绕组的总高度为 H ,绕组对地总电容为 C_0 ,可用同轴圆柱公式计算;纵向等值电容为 C_1 ,主要包括匝间几何电容与层间几何电容,可根据电场能量等效原理来计算。

由于绕组为分布参数,在绕组高度为 dx 上的对地电容为 $(C_0/H)dx$,绕组高度为 dx 的匝间纵向电容为 $(C_1/H)dx$, dx 高度绕组两端的电压差为 du ,设距绕组首端距离为 x 处的电压为 u ,电荷为 Q ^[4]。

对电容 $(C_0/H)dx$ 有:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{uC_0}{H} \tag{2}$$

在电容 $(C_1/H)dx$ 上的电荷为

$$Q = \frac{C_1H}{dx} du \tag{3}$$

$$\text{则 } \frac{dQ}{dx} = C_1 H \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (4)$$

由式(2)与式(4)可得

$$C_1 H \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{C_0}{H} u \quad (5)$$

机车高压互感器高压线圈末端接地, 可得边界条件: 首端 $x=0, u=U_0$; 末端 $x=H, u=0$ 。解式(5)所示的微分方程可得

$$u = \frac{U_0 [e^{\alpha(H-x)} - e^{-\alpha(H-x)}]}{e^{\alpha H} - e^{-\alpha H}} = U_0 \frac{\text{sh} \alpha(H-x)}{\text{sh} H} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \alpha = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{C_0}{C_1}} \quad (7)$$

可得距绕组首端 x 处沿绕组高度方向的起始电压

$$\text{梯度为 } E = -\frac{du}{dx} = U_0 \alpha \frac{\text{ch} \alpha(H-x)}{\text{sh} \alpha H} \quad (8)$$

所以绕组首端最大电位梯度为

$$E = \left(-\frac{du}{dx}\right)_{x=0} = U_0 \alpha \frac{\text{ch} \alpha H}{\text{sh} \alpha H} \quad (9)$$

当 $\alpha H \geq 3$ $\text{sh} \alpha H \approx \text{ch} \alpha H$, 这时, 这时绕组首端的电位梯度为

$$E_{\max} = U_0 \alpha = \alpha H \frac{U_0}{H} = K \frac{U_0}{H} \quad (10)$$

式中: $K = \alpha H$; $\frac{U_0}{H}$ 为绕组的平均电压梯度。

图3中, $K=1, 2, 3, 4$ 为高压线圈各点的起始电压分布, $K=0$ 为电压沿绕组的稳定分布。可见初始分布中高压线圈各点电压分布是不均匀的, 首端电位变化较快, 梯度较大, 电位变化和梯度由首端向末端逐渐变小。一般来说, 对于高压电压互感器, $K=5 \sim 20$, 线圈首端的电位梯度约为平均电位梯度的5~20倍, 绕组首端呈现很高的电位梯度, 这对绕组首端的绝缘有很大的危害^[4]。且 K 越大, 梯度曲线越陡, 起始电压分布越不均匀。

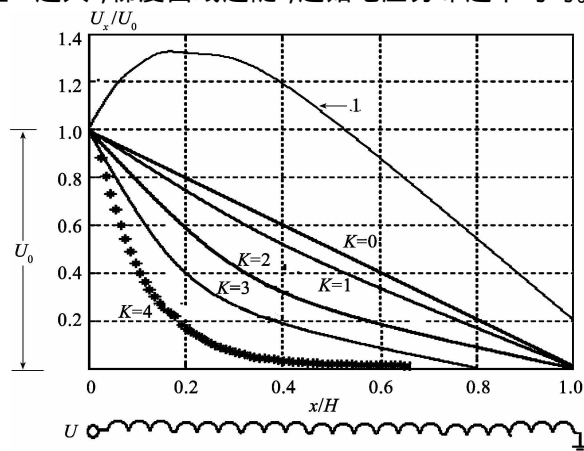


图3 电压互感器高压线圈起始电压分布特性

由于高压线圈中各点电压的起始分布与稳态分布不相同, 因此在短暂过渡过程中, 很容易出现电压波

振荡。将振荡过程中高压线圈各点出现的最大电位连接起来叫做最大电位包络线。由图3中最大电位包络曲线1可知, 主绝缘遭受的最大电压大约位于高压线圈C段的中前沿部分。从图4的梯度电压波形可知, 最大梯度电压出现在1号梯度(1号梯度位于高压线圈首端), 幅值是首端注入电压的10%^[1]。

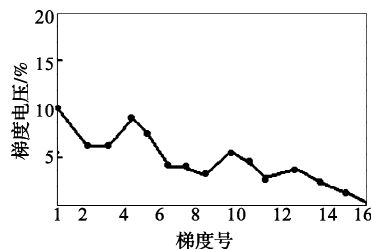


图4 电位分布与梯度分布关系

机车电压互感器长期在多变的环境下运行, 可能会经常受到暂态电压的侵入。当暂态电压侵入高压线圈时, 沿绕组高度上的电压分布取决于匝间纵向电容和对地电容的比例, 因为起始电压沿线圈各点的分布很不均匀, 使得流过每个匝间电容的电流不相等, 靠近输电线端的匝间电容流过的电流最大, 越往后则越小。HXD1B型电力机车电压互感器高压线圈C段是靠近A端子处前20%的区段, 由前面的分析可知, x 越小, 即越靠近高压互感器A端子的部位(电压引入端), 匝间的电位梯度就越大。由式(10)可知, 高压线圈的首端(C段)甚至会承受高于平均值5~20倍的电压梯度, 使得C段最高瞬间匝间与层间电压远高于施加电压, 反复施加的过电压会加速C段线圈的绝缘老化。高压电压互感器出现烧损故障时, 电力机车已运行数万公里, 线圈的绝缘已经有不同程度的老化, 这种情况下一旦接触网上有较高的冲击过电压侵入高压线圈, 极易造成线圈的匝间与层间的绝缘击穿, 出现机车在运行过程中网压虚高的特征, 直至高压互感器烧损与炸裂。

3 故障控制及预防措施

暂态电压作用于互感器高压线圈时初始电位分布与稳态电压分布不同, 易导致高压线圈内部产生电压振荡。为防止暂态电压引起的电压振荡, 电压互感器在设计时普遍采用绕组首端连接静电屏, 如果静电屏与高压线圈之间的电容参数选择恰当, 可使初始分布接近稳态分布, 从而降低高压线圈首端匝间、层间在振荡过程中的最大电位与最大梯度。但是在雷电等冲击过电压作用下, 静电屏只能使匝间与层间电压分布有所改善, 高压线圈C段的前几层导线间的电压分布仍然比稳态分布大很多, 没有从根本上解决冲击过电压通过高压线圈初始分布电压不均匀的问题。考虑到冲击电压作用于高压线圈的瞬间, 电压主要降落在绕组的首端, 因此在设计高压线圈的绝缘时, 尤其要考虑绕组首端的绝缘裕度, 加厚C段匝间与层间绝缘, 提高其绝缘等级。同时, 为了防止电压互感器在运行过程中烧损、炸裂, 引发行车事故, 可以采用以下预防措施进行控制。

监测机车的网压变化,根据故障代码出现频次检测高压电压互感器的短路故障。

高压电压互感器已发生匝间或层间短路但还未烧损仍具备检测功能时,其所输出的网压数据会连续超高。利用这一点,可以通过采样监测机车的网压变化,输出控制信号,以限制当高压电压互感器已短路时司机多次升弓合闸,造成高压电压互感器的炸裂和接触网接触线烧断,从而导致本是高压互感器的故障恶化成行车安全事故的情况。

运行过程中,对机车的网压数据采样,如果在30 min内连续出现故障代码“1199”10次或故障代码“1200”5次时,则实现主逆变器封锁,主断路器立刻断开,禁止升弓动作并在微机显示器上显示高压互感器故障。对网压检测流程如下:

机车升弓后,开始网压检测,正常网压应在17~31 kV的范围内。如果网压高于31.5 kV超过40 s,主断路器将被分断,当网压低于31 kV超过20 s后,主断路器才允许重新合上。如果网压高于32 kV,主断路器立刻断开,只有当网压低于31 kV后主断路器才允许重新合上。

在高压电压互感器的高压线圈的C段处理设温度传感器。

由于电位梯度分布的原因,高压电压互感器的高压线圈C段处容易造成绝缘的击穿,引发匝间和层间绝缘故障。当互感器发生匝间与层间短路时,由短路所造成的发热会使周边的温度升高。利用这一点,在

高压线圈C段处理设温度传感器,以监测高压电压互感器的运行温度,当超过预设的阈值时,则输出控制信号报警指示高压电压互感器故障。

4 结语

本文对机车高压电压互感器在运行过程中频繁烧损的情况从结构与理论两方面进行了分析,得出:高压互感器的高压线圈之所以C段烧损居多,其根本原因是暂态电压侵入线圈时,沿线圈形成极不均匀的初始电位分布。一般情况下绕组首端的电位梯度是平均电位梯度的5~20倍,首端电位梯度远大于绕组其他部位,造成绝缘的击穿,引发匝间和层间短路故障。且初始电位分布与稳态电压分布不同,易导致高压线圈内部产生电压振荡。针对故障现象从高压电压互感器的设计与运行两个方面提出了相应的预防措施,防止电压互感器在运行途中烧损,避免由此引发的行车事故。

参考文献:

- [1] 郑殿春, 襄玉雷, 等. 分段层式干式变压器绕组的暂态电压分布特性[J]. 变压器, 2010(6).
- [2] 翟启斌. HXD1B型电力机车故障分析与对策[J]. 机车电传动, 2010(3): 68-71.
- [3] 宋小卫. 35 kV电压互感器高压侧熔断器异常熔断原因研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [4] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 25-35.
- [5] 刘铁英. 分段层式干式变压器线圈波过程及传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.

(上接第62页)

化操纵,在过分相前将风打满,防止过分相后打风带载启动造成辅助变流器故障。

5 结语

经过采取以上措施,辅助变流器的工作稳定性有了很大的提高。2010年7月至10月间虽为辅助变流器故障高发季节,但济南机务段辅助变流器故障仅仅发生3件,且均未造成停车,大大减少了对行车安全的影

响。辅助变流器作为劈相机的替代产品,克服了劈相机输出电压三相不平衡、噪声大、对电网污染严重的缺点,在使用过程中只要做到精检细修、正确使用,就可以大大减少故障率,提高运用可靠性。

参考文献:

- [1] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 杨永林. SS7E型电力机车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

《机车电传动》

欢迎 垂询 订阅 赐稿 刊登广告

跟踪世界科技动态 致力中国轨道交通

- ◆ 轨道牵引动力的主导刊物
- ◆ 荟萃电力与内燃牵引技术成果
- ◆ 涵盖干线铁路与城轨交通两大领域