

铁路车辆 25 kV 电压互感器直流偏磁性能试验研究

马 明 孔祥宇 张 璐

(中车长春轨道客车股份有限公司质量保证部,130062,长春//第一作者,工程师)

摘 要 针对我国电气化铁路机车和动车组 25 kV 电压互感器过热烧损情况,设计了可对 25 kV 电压互感器进行直流偏磁性能试验的方法。通过对国产和进口型号 25 kV 电压互感器直流偏磁性能试验,获得了它们的抗直流偏磁性能数据。理论分析和现场测量表明,接触网最高可能发生 4 kV 直流偏磁电压,按统计学计算,产品的抗直流偏磁水平应达到 2.5 kV,而目前多数产品的抗直流偏磁水平一般只能达到 1.5 kV,这是造成 25 kV 电压互感器运行中过热烧损的主要原因。因此,在产品的标准化设计中应重点考虑抗直流偏磁的参数大小。通过试验对比可知,采用部分磁路气隙设计的产品比采用降低额定工作磁密设计的产品有更好的抗直流偏磁性能,可以满足抗直流偏磁水平 2.5 kV 的要求。

关键词 铁路; 机车; 动车组; 电压互感器; 直流偏磁

中图分类号 U264.3; U270.38⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.02.022

Experimental Study on the DC Bias Performance of Railway Vehicle 25 kV Voltage Transformer

MA Ming, KONG Xiangyu, ZHANG Lu

Abstract In view of the overheating burning accident of 25 kV voltage transformers in electrified railway locomotives and EMU of China, a method to test the DC biasing performance for 25 kV voltage transformer is designed. The DC bias magnetic performance data of domestic and imported 25 kV voltage transformers are obtained through test. Theoretical and on-site measurements indicate that the contact network may have a maximum 4 kV DC bias voltage. According to statistics, the anti-DC bias level of products should achieve 2.5 kV, but the current DC bias level of most products is measured only 1.5 kV, that is considered as the main cause of the overheating burning accident in the operation of 25 kV voltage transformers. Therefore, the anti-DC bias parameter is the key point to be considered in the standardized design of subsequent products. Through experimental comparison, products with partial magnetic path air-gap design have better resistance to DC bias than products with reduced rated magnetic flux design, and can meet the requirements of 2.5 kV anti-DC bias level.

Key words railway; locomotive; EMU; voltage transformer; DC bias

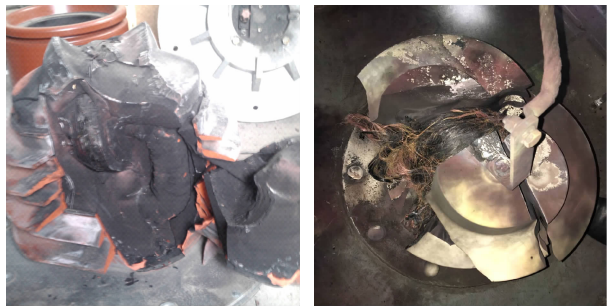
Author's address CRRC Chang Chun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

铁路机车和动车车辆使用变频驱动,为了提高电能利用效率,变流器使用了可以正向和逆向工作的四象限斩波器,既能从牵引变压器接受电力,也能把制动产生的电力回馈给牵引变压器。因此,在变流器的 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)开关过程中,牵引变压器工作在不断发生的涌流和截流状态,牵引变压器的二次绕组会流过非周期电流,并且在一次绕组中感应出非周期电压。大量的非周期电压叠加后形成低频脉动电压。这种低频脉动电压对牵引变压器和电压互感器都会造成直流偏磁效果,容易使铁心磁路饱和。由于牵引变压器容量很大,一次回路电阻不到 1 Ω ,绕组的时间常数达到数分钟,直流偏磁现象表现不明显。而电压互感器一次回路电阻达到数 10 k Ω ,时间常数只有数秒,一次回路容易产生幅值数 10 mA 的直流电流。在直流偏磁下,电压互感器的铁心磁路会进入饱和状态,而饱和一旦发生,一次绕组的励磁电抗将大幅下降,使一次电流大增。由于接触网直流偏磁现象的存在,机车和动车车辆的 25 kV 电压互感器不时会发生过热爆裂事故(见图 1)。尽管电压互感器制造企业采取了多种措施,但由于缺乏可以指导抗直流偏磁设计的技术标准,以及可以检验产品抗直流偏磁能力的试验方法,国产化产品在抗直流偏磁性上还没有达到整体性的提升。为了推动这一工作,需要对已经使用的具有不同抗直流偏磁原理的 25 kV 电压互感器进行试验研究,以便确定一种标准化的试验方法,能够对 25 kV 电压互感器抗直流偏磁性能进行有效评估,并结合我国电气化铁道牵引接触网的电源污染状态,提出能够满足我国电气化铁路车辆运行要求的 25 kV 电压互感器抗直流偏

磁技术标准。

1 直流偏磁试验设备

直流偏磁引起电压互感器器身过热爆裂的事故多数发生在 10 kV 和 35 kV 配电网以及 27.5 kV 铁路接触网,已有很多用户的技术人员以及国内一些电压互感器制造企业对电压互感器的直流偏磁特性进行过试验研究。其中一种间接试验方法是把直流电压施加到电压互感器的二次绕组,产生试验需要的直流磁势,与此同时,在一次绕组施加交流电压。这种试验方法不会引起提供一次电压的交流试验变压器直流偏磁,可以使用常规的试验变压器进行试验。铁路机车和动车车辆用的 25 kV 电压互感器电压比通常有 25 kV/100 V 和 25 kV/150 V 两种,按一次直流偏磁电流 50 mA 计算,在二次直流励磁时,相应的直流偏磁电流分别为 12.5 A 和 8.33 A。对有的产品来说,这么大的电流持续通过二次绕组,可能会使二次绕组过热,因此需要谨慎使用。另外一个不宜使用二次直流偏磁方法的重要原因是缺乏等效性,因为实际运行时直流电流和交流电流同时流过电压互感器一次绕组,而不是分别从一次绕组和二次绕组流过。这两种试验方法所得到的绕组发热状态有很大不同,不能把通过间接试验方法得到的结果当作产品在实际运行时的抗直流偏磁水平。

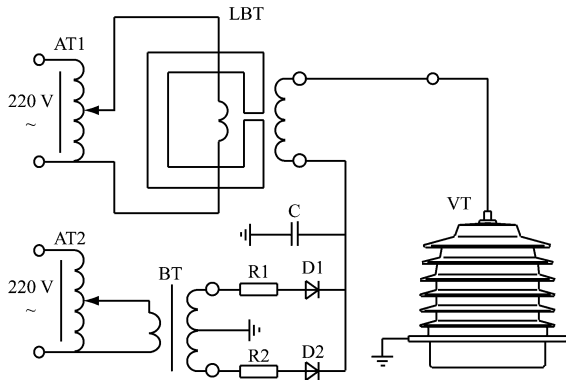


a) 实景图 1

b) 实景图 2

图 1 炸裂的电压互感器

基于以上考虑,应采用在一次绕组同时施加直流电压和交流电压的试验方案。为此,需要使用特别设计的高漏磁试验变压器。该变压器的抗直流偏磁技术指标设定为:75 mA 直流偏磁电流下,变压器的铁心磁路不饱和。图 2 为 25 kV 电压互感器直流偏磁试验电路图。



注:AT1、AT2——调压器;LBT——高漏磁试验变压器;VT—25 kV 电压互感器;C——滤波电容器;D1、D2——高压硅堆;R1、R2——限流电阻;BT——二次中心抽头变压器

图 2 25 kV 电压互感器直流偏磁试验电路图

2 直流偏磁试验程序

直流偏磁试验需要达到 2 个目的:一是获知试品在直流偏磁下一次绕组的温升特性,以便对产品的直流偏磁设计进行评估;二是获知试品抵御直流偏磁的能力,即在施加额定一次交流电压状态下,试品能长期在一次回路叠加的直流电压值下工作。针对上述目的,设计了直流偏磁电压序列试验和抗直流偏磁电压试验 2 种试验程序。

2.1 直流偏磁电压序列试验

直流偏磁电压序列试验的目的是通过对试品依次施加从低到高的直流偏磁电压,得到试品一次绕组温升与一次直流偏磁电压的相关曲线。试验时可根据需要选择一个直流电压序列,推荐选取以下序列:0、100 V、250 V、500 V、750 V、1 000 V、1 250 V、1 500 V、1 750 V、2 000 V、2 250 V、2 500 V、3 000 V。试验时在试品一次回路 N 端子串入一只 100 Ω 、5 W 电阻接地,电阻两端接入数字示波器测量一次电流有效值,还要接入直流电压表测量一次直流电流值;在试品二次侧和调压器输出端各接入交流电压表,然后在直流电源输出端与地之间接入直流高压表。选用仪表及量程时应使电压与电流的测量误差不超过 $\pm 5\%$ 。试验开始前先记录实验室环境温度 T_1 ;然后在零直流偏压下用调压器 AT1 升起交流电压,按试品二次电压指示把一次电压调至 25 kV,并在试验过程中保持调压器 AT1 输出的交流电压不变。

记录零直流偏磁电压下试品的一次电流有效值和直流分量。然后施加测量序列中的第一个直流偏压。尽快记录在此偏压下的直流电流值,用直

流电压除以直流电流得到一次回路的电阻值,减去试验变压器的二次绕组电阻值,就得到试品一次绕组电阻初值。保持交流和直流电压不变,观察直流电流表的示值不断减小,到 2 min 内变化不超过示值的 2% 后,认为达到热稳定,记录此时试品一次电流有效值的直流电流值并计算一次绕组温升。一次绕组的温升通过测量绕组施加的直流电压和流过的直流电流以及铜电阻的温度系数来进行计算。

为了不造成试品失效,需要控制一次绕组的温升。虽然多数产品的绝缘耐热等级标称为 F 级,允许温升 110 ℃,最高工作温度 130 ℃,但由于试验时间稍长,为了减少试品的寿命损失,宜取 110 ~ 120 ℃作为绕组最高试验温度。试验前先用电阻表测量一下一次绕组直流电阻,并根据实验室环境温度计算出绕组达到 110 ℃时的直流电阻,如果一次绕组温度已达到或超过 110 ℃,就不再使用更高的试验电压。

2.2 抗直流偏磁电压试验

抗直流偏磁电压试验的目的是通过对试品不断施加额定的一次交流电压和额定的直流偏磁电压,使试品的一次绕组发热。试验过程中不断测量一次绕组的直流电阻并计算其温升和温度。

试验设备及试验接线与直流偏磁电压序列试验相同,实际上是选定试验电压序列中的某个电压,从开始到结束一直不变。如果试验过程中,连续 5 min 之内直流电流不再减少,即认为达到热平衡,可以结束试验。

3 直流偏磁试验结果

选择了 3 个供应商同类型 25 kV 电压互感器进行直流偏磁试验,环境气温为 20 ℃,交流电压为 25 kV。试验结果见表 1(国产 A 型号产品)、表 2(进口 B 型号产品)和表 3(国产 C 型号产品)。

4 直流偏磁电压的设防水平与技术措施

目前我国已经国产化生产的铁路电气化机车和动车车辆 25 kV 电压互感器按铁道标准 TB/T 3038—2002《电气化铁道 50 kV、25 kV 电压互感器》生产,进口产品按 IEC 60044—2《测量用互感器 第 2 部分:电磁式电压互感器》生产。除此之外,还有欧盟标准 EN 50152—3—3《电气化铁道 固定安装式交流开关设备的特殊要求 第 3-3 部分:用于交流牵引系统的测量、控制和保护设备——电磁式单

表 1 25 kV 电压互感器(国产 A 型号产品)				
直流偏磁试验结果				
直流偏磁 电压/V	一次直流 电流/mA	一次电流 有效值/mA	一次绕组 电阻/kΩ	一次绕组 温升/℃
0	0	1.4	36.0	0.1
100	2.7	3.0	37.0	7.0
250	6.4	7.2	39.0	21.0
500	12.0	20.0	42.0	49.0
750	16.0	28.0	45.0	64.0
1 000	21.0	38.0	48.0	85.0
1 250	24.0	51.0	52.0	106.0

表 2 25 kV 电压互感器(进口 B 型号产品)				
直流偏磁试验结果				
直流偏磁 电压/V	一次直流 电流/mA	一次电流 有效值/mA	一次绕组 电阻/kΩ	一次绕组 温升/℃
0	0	1.1	26.0	0.1
100	3.8	7.8	26.4	4.0
250	9.2	16.0	27.0	10.0
500	18.0	29.0	28.0	27.0
750	25.0	42.0	30.0	29.0
1 000	31.0	51.0	32.0	59.0
1 250	36.0	59.0	34.0	78.0
1 500	41.0	68.0	37.0	108.0

表 3 25 kV 电压互感器(国产 C 型号产品)				
直流偏磁试验结果				
直流偏磁 电压/V	一次直流 电流/mA	一次电流 有效值/mA	一次绕组 电阻/kΩ	一次绕组 温升/℃
0	0	1.4	61.0	0.1
100	1.6	3.0	61.3	1.3
250	4.1	6.0	61.5	2.1
500	8.1	10.0	62.0	4.2
750	12.0	13.0	62.5	6.3
1 000	16.0	16.0	63.0	8.4
1 250	20.0	20.0	64.0	13.0
1 500	23.0	23.0	66.0	21.0
1 750	26.0	26.0	68.0	29.0
2 000	28.0	29.0	71.0	42.0
2 250	31.0	33.0	73.0	50.0
2 500	33.0	37.0	76.0	63.0
3 000	36.0	41.0	80.0	80.0
3 500	41.0	46.0	85.0	101.0

相电压互感器》,该标准 8.2 条规定一次绕组的直流电阻不低于 50 k Ω ,8.3 条规定在额定电压、频率 16.67 Hz 下能长期运行。EN 50152—3—3 中的这两条内容明显是要求产品在额定电压下的工作磁密足够低,在牵引接触网可能出现的直流电压和次谐波电压下磁路不会深度饱和,避免一次绕组过热损坏。为此,进口 B 型号产品的 25 kV 电压互感器技术标准中有一次绕组施加 25 kV、50 Hz 交流电压,并叠加 3 kV 直流电压的短时耐受试验,但没有说明试验时间。从表 2 试验数据可知,进口 B 型号产品如果被长期施加直流偏磁电压,最多只能承受 1 500 V。2015 年 12 月,G6301/G6304 次列车(广州南—潮汕)和 G2030 次列车(天津—北京南)上烧损的 2 台电压互感器均为该型号进口产品。根据车载数据终端记录,损坏发生在非分相区,这表明该型电压互感器的抗直流偏磁水平还不能满足我国电气化铁路高密度行车的要求。

多年来,国内外所有对接触网电源污染的理论研究和现场实测结果都表明,牵引接触网出现的直流偏压不会超过 4 kV。按这个测量数据考虑设防水平应该是十分可靠的。可以认为每次直流偏压的随机发生都经历电压从低到高的过程,根据统计学理论,认为偏磁电压符合正态分布。于是取 4 kV 等于 3 倍标准差,并按 2 倍标准差作为大概率事件发生区间,即设防电压取 $4 \text{ kV} \times 2/3 = 2.66 \text{ kV}$,可标准化为 2.5 kV。如果产品的抗直流偏磁水平能达到这一标准,25 kV 电压互感器烧损的事故率一定会有实质性的下降。国产 A 型号和进口 B 型号产品的直流偏磁电压设防水平略高于 1.5 kV,与 2.5 kV 相比还有很大差距。这两种型号的电压互感器额定工作磁密已经按 25 kV 和 16.67 Hz 的运行要求设计,额定峰值磁密取到 0.6 T。要继续降低额定磁密就要增加铁心截面积和增加绕组匝数,而这会使电压互感器的体积和质量显著增加。

国产 C 型号产品采用了另一种方法,设计的铁心截面和绕组匝数仍保持不变,只是在铁心磁路上切出部分气隙,切开的面积大约占铁心总截面积的 30%,未切开的铁心截面要保证外加电压达到额定电压 150% 时不发生磁饱和。当一次电压出现显著的直流分量时,带气隙的铁心磁路段会进入磁饱和,电压互感器一次绕组转而工作在扼流电抗器状态,能有效地抑制一次励磁电流增加,防止一次绕

组过热现象发生。根据表 3 的试验结果,国产 C 型号产品的直流偏磁电压设防水平达到了 3.5 kV,完全满足 2.5 kV 的设防水平要求。

5 结语

针对我国电气化铁路行车密度高的特点,在进行机车和动车车辆 25 kV 电压互感器国产化设计时,必须考虑提高直流偏磁电压设防水平。根据理论计算与现场测量,接触网出现的直流电压最高不超过 4 kV,按正态分布计算,取两倍的标准差,即 2.5 kV 作为设防水平是合适的。

提高电压互感器抗直流偏磁电压能力,可以采用降低额定磁密的设计或者使用部分气隙铁心的设计,但最后都必须进行直流偏磁性能试验。试验时在电压互感器的一次绕组同时施加额定交流电压和设定的直流偏磁电压,通过绕组的电阻值计算绕组的温升和温度。对于绝缘 F 级的电压互感器,试验时绕组达到的最高温度不宜超过 110 $^{\circ}\text{C}$ 。试验时间应足够长,在观测到绕组温度不再升高时才可结束。

参考文献

- [1] 王向东. HXD1B 型电力机车高压电压互感器故障分析及建议[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(6): 101.
- [2] 任朝阳. HXD1B 机车 JDZXW2-25A2 型高压电压互感器炸裂原因分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(4): 107.
- [3] 侯永亮, 焦广旭. 电压互感器受到的直流电流影响分析[J]. 山西电力, 2009(4): 18.
- [4] 周小梅, 杨以涵, 谭伟璞. 配电系统 PT 高压熔断器熔断的原因分析[J]. 现代电力, 2007, 24(4): 34.
- [5] 陈飞, 田园. 10 kV 电压互感器高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 88.
- [6] 韩芳, 陈绍英. 10 kV 系统电压互感器烧损事故解析[J]. 中低压电器技术, 2003(8): 43.
- [7] IEC. Instrument Transformers Part 2: Inductive voltage transformers; IEC 60044—2—2002 [S]. Geneva: IEC, 2002.
- [8] CENELEC. Railway applications—Fixed installations—Particular requirements for a. c. switchgear—Part 3—3 Measurement, control and protection devices for specific use in a. c. traction systems—Single-phase inductive voltage transformers; EN 50152—3—3—2001 [S]. Brussels: CENELEC 2001.
- [9] 中国铁道科学研究院机车车辆研究所. HXD3C、HXD3B 电力机车电压互感器应用环境试验报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院机车车辆研究所, 2011.

(收稿日期: 2018-11-08)