

# 某 CRH3 型高速铁路动车组电压互感器过热烧损故障原因分析及解决措施

禹睿枫 马 明 周 月

(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, 高级工程师)

**摘 要** 根据接触网的供电设计及动车组的牵引系统结构, 对我国高铁动车组的车顶电压互感器爆裂故障原因进行分析, 得到主要故障原因为: 目前使用的 25 kV 电压互感器未能满足我国高铁牵引接触网电源污染的设防要求。针对故障原因提出, 将直流偏磁电压设防值从 1 500 V 提高到 2 500 V, 进而提高电压互感器抗直流偏磁的能力。采取的具体技术手段为: 在电压互感器铁心磁路上切出部分气隙, 使电压互感器一次绕组在发生直流偏磁时转变成铁心电抗器运行, 把一次电流限制在安全运行水平。根据试验验证结果, 改进后的电压互感器能满足 2 500 V 直流偏磁电压设防要求。

**关键词** 高速铁路动车组; 电压互感器; 过热烧损

**中图分类号** TM451:U266.23

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.04.023

## Cause Analysis of Voltage Transformer Overheating Burnout Failure for CRH3 High-speed Railway EMU and Countermeasures

YU Ruifeng, MA Ming, ZHOU Yue

**Abstract** Starting from the catenary power supply design and EMU (electric multiple unit) traction system structure, the causes of vehicle roof voltage transformer burnout failure of high-speed railway EMU in China are analyzed, and the 25 kV voltage transformer currently in service that fails to meet the fortification requirements for the high-speed railway traction catenary power pollution in China is detected as the main cause. Targeting this cause, it is proposed to increase the setting value of DC bias voltage from 1 500 V to 2 500 V, thus improving the voltage transformer ability to resist DC bias. The specific technical means is to cut part of the air gap on the core magnetic circuit of the voltage transformer, so that the primary winding of the voltage transformer can be converted into core reactor operation in case of DC bias, and the primary current can be limited to safe operation level. According to the test verification results, the improved voltage transformer can meet the protection requirements of 2 500 V DC bias voltage.

**Key words** high-speed railway EMU; voltage transformer; overheating burnout

**Author's address** Quality Assurance Department, CRRC Changchun Railway Vehicle Co., Ltd., 130062, Changchun, China

## 1 故障现象及故障原因分析

### 1.1 故障现象

在某 CRH3 型动车组始发前, 随车机械师站台巡视时发现, 7<sup>#</sup>车受电弓下的 GSEFB 25F 型电压互感器爆裂。回库检查发现, 是电压互感器一次绕组爆裂(如图 1 所示)。



a) 电压互感器近照

b) 现场整体

图 1 爆裂互感器现场照片

Fig. 1 Site photos of burnout transformer

根据事故发生时的 MVB(多功能车辆总线)数据记录, 网压在 10:24:06 从 27.80 kV 逐步上升, 至 10:24:38 达到 31.14 kV, 此时司机针对网压异常情况操作主断开路, 但主断开路后网压仍持续上升, 10:24:46 达到 34.12 kV, 再持续 6 s 后电压互感器发生爆裂, 从网压异常升高到电压互感器爆裂, 过程约持续有 1 min。

### 1.2 故障原因分析

动车组车顶的电压互感器是电磁式结构, 采用

树脂浇注绝缘。电压互感器的绝缘在过热或过电压时容易损坏,且绝缘损坏是不可恢复的。绝缘损坏一旦发生,就会不断恶化,直至互感器烧损。

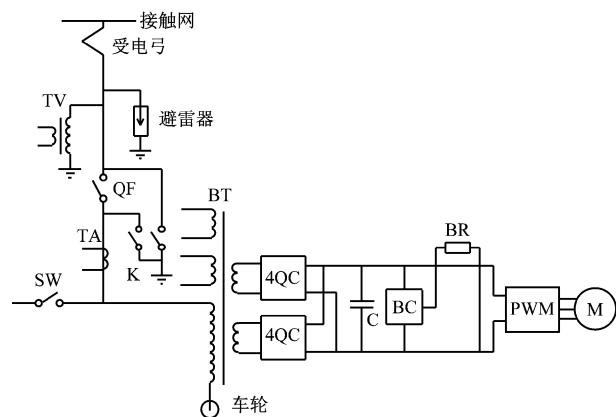
电压互感器的烧损与接触网上的电压变化密切相关,而接触网上的电压参数同牵引网的供电设计及用电特性又密切相关。要分析电压互感器烧损的原因,就要从接触网的供电设计及动车组的牵引动力系统着手。

### 1.2.1 接触网的供电设计

目前,高速铁路牵引变电站间的电力交接普遍使用关节式换相装置(以下简称“过分相”)。在两侧接触网之间设置1个行驶长度约为150 m的无电区。无电区使用同两侧接触网及地网都不连接的中性线与受电弓接触。动车组惰行通过无电区,进而实现有电区→无电区→有电区的平滑过渡。

### 1.2.2 动车组的牵引系统结构

CRH3型动车组的牵引动力系统如图2所示。安装在车顶的受电弓与轨道上方的接触网连接,电流从接触网沿受电弓进入车顶的电力电缆,流经QF(真空断路器)进入拖车底架上BT(5 600 kW牵引变压器)的原边绕组。BT的4个牵引绕组各输出额定值为1 550 V的交流电压,经电缆送到车架上的网侧变流器,通过4QC(四象限斩波器)变换为2 600 V直流电压,为PWM(脉宽调制)牵引逆变器供电。PWM产生0~2 800 V的0~200 Hz三相电压,输送给转向架上的M(牵引电机)。M的动力通过联轴节和齿轮箱输出到车轮上,使动车组得以在轨道上运行。



注:TV为25 kV电压互感器;TA为电流互感器;K为接地开关;SW为联络开关;C为支撑电容器;BC为制动斩波器;BR为制动电阻。

图2 CRH3型动车组牵引动力系统

Fig.2 Traction power system of CRH3 EMU

当动车组运行时,四象限斩波器的IGBT(绝缘栅双极型晶体管)在非电流过零时的开关脉冲会使牵引变压器发生涌流和截流。多次涌流和截流的叠加作用使接触网电压中包含大量谐波、次谐波和非周期分量。这些非50 Hz正弦电压分量会增加电压互感器一次绕组电流,使器身异常发热。

当动车组过分相时,通过接触网与中性线之间的电容作用,电压互感器的一次回路电感会与中性线对地电容发生谐振。若谐振性质是铁磁谐振,则会产生很大的励磁电流;若谐振性质是串联谐振,则会产生很高的电压。这些都会对电压互感器产生危害。这已被车载录波装置所证实,而通过电磁过程仿真计算也得到了理论上的支持<sup>[14]</sup>。针对烧损原因可以对动车组25 kV电压互感器进行防烧损设计,以提高电压互感器抵抗接触网电压异常状况的能力,把事故率控制在可以接受的程度之内。

### 1.3 某CRH3型动车组电压互感器烧损原因分析

在上述GSEFB 25F型电压互感器烧损事故的相关数据中,出现了长达约1 min的电压异常升高记录。经事故分析认定,网压异常的原因是互感器原边线圈匝间短路后变比改变,且可以断定事故发生时报送的网压是工频电压而不是谐波电压。

拆解烧损后的电压互感器发现,一次绕组层绝缘和导线的绝缘漆整体被高温烤焦变色。绕组发热的现象十分明显。当绕组过电压引发绕组绝缘击穿时,虽然会直接引起内部电弧放电,也会发生互感器器身爆裂,但器身爆裂后不会观察到线圈有整体过热现象。对动车组过分相时烧损的1台JDZXW2-25A2电压互感器,解剖一次绕组线圈和二次绕组线圈发现,层绝缘和漆包线的色泽并无可察觉的变化,损坏情况明显与图1不同。

由此可知,损坏后的GSEFB 25F型互感器绕组存在过热现象,故排除了电压互感器过电压损坏的原因。

SEFB 25F型电压互感器是按照EN 50152-3-3:2016设计的,其生产厂家还有自己的企业标准。SEFB 25F型电压互感器出厂时经过特殊试验的测试<sup>[6]</sup>:①一次绕组施加25 kV、50 Hz交流电压,并叠加3 kV直流电压的短时耐受试验;②一次绕组施加15 kV、三分频交流电压,并叠加1.5 kV直流电压的短时耐受试验。可以看出,GSEFB 25F型电压互感器的设计已充分考虑了接触网上三分频电压和直流电压的情况应对。

GSEFB 25F 型电压互感器烧损,说明适用于欧洲的三分频电压和直流电压设防水平没有达到抵御我国高铁动车组牵引网的电源污染要求。我国高铁动车组的行车密度远高于欧洲,相应地,牵引网中的低频脉动电压和非周期电压也远高于欧洲。牵引网中的低频脉动电压和非周期电压容易引起电压互感器铁心磁饱和,造成电压互感器一次绕组电流异常增加。一般来说,牵引接触网没有恒定直流电压。但对于常规的 50 Hz 来说,非周期电压和低频脉动电压造成的励磁电流可采用直流偏磁方法来估算,计算简单且不会影响结论的正确性。

电压互感器的直流偏磁是一个电工理论问题,其物理现象是电压互感器绕组的直流电流磁势与交流电流磁势叠加。如果叠加后磁势幅值超过饱和磁势,就会使铁心进入磁饱和,在电流的正半波或负半波时间段内,励磁电流幅值大增,不仅使一次绕组异常发热,也会使电压互感器一次回路的熔断器熔断,进而使没有一次熔断器保护的电压互感器烧损。

## 2 解决措施

由上述分析,本文提出对应的解决措施:首先,应确定造成 25 kV 电压互感器烧损的直流偏磁电压临界值;然后,根据该临界值来优化电压互感器,实现直流偏磁电压的控制,进而实现对抗线路上的直流偏磁,从而避免电压互感器一次绕组异常发热,解决电压互感器烧损问题。

### 2.1 直流偏磁电压临界值的理论分析

直流偏磁电压临界值只能通过样机试验研究来确定。本文以一台 GSEFB 25F 树脂浇注的 25 kV 电压互感器(以下简称“25 kV 电压互感器”)为试验对象进行温升试验。

#### 2.1.1 一次绕组直流电阻的计算

对 25 kV 电压互感器的一次绕组施加恒定的直流电压  $U_0$ ,测量试验初始时一次绕组回路的直流电流  $I_1$ 、温升前器身表面的温度  $T_1$ ,以及温升后的一次绕组或器身表面温度  $T_2$ 。其中: $T_2$  用红外温度计测量,当一次绕组的器身表面温度变化在 30 min 内不超过 1 °C 时,取互感器顶部、中部和底部三处温度测量值的算术平均值; $T_1$  按实验室墙壁上的环境温度计取值。计算可得,器身表面温度为  $T_1$  时一次绕组的直流电阻  $R_1 = U_0/I_1$ 。

保持  $U_0$  不变,测量  $T_2$  和此时的一次绕组回路的直流电流  $I_2$ ,并算出器身表面温度为  $T_1$  时一次绕

组的直流电阻  $R_2 = U_0/I_2$ 。

#### 2.1.2 一次绕组内部温度的计算

根据  $R_1$  及  $R_2$ ,升温后一次绕组内部温度  $T_3$  为:

$$T_3 = [T_1 + R_2/(R_1 c)] - 1/c \quad (1)$$

式中:

$c$ ——铜的电阻温度系数,取值为  $1/(235\text{ °C})$ 。

#### 2.1.3 热阻的计算

温升后,一次绕组热功率  $P_0 = U_0 I_2$ ,则计算可得一次绕组线圈外树脂层热阻  $\theta_1 = (T_3 - T_1)/P_0 = 0.44\text{ °C/W}$ ,树脂层表面与环境空气的热阻  $\theta_2 = (T_2 - T_1)/P_0 = 0.13\text{ °C/W}$ 。故总热阻为  $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 0.57\text{ °C/W}$ 。

#### 2.1.4 温升后直流偏磁电压的变化

25 kV 电压互感器设计为 F 级绝缘,当参考环境温度  $T_1 = 20\text{ °C}$  时,温升限值为  $110\text{ °C}$ 。相应的,当环境温度  $T_2 = 40\text{ °C}$  时,由  $\theta$  计算可得,一次绕组的热功率限值为  $P_{\text{限}} = 158\text{ W}$ 。 $R_1$  按一般情况取  $37\text{ k}\Omega$ ,若只考虑一次绕组的电阻发热,可算得对应的一次电流限值  $I_{\text{限}} = (P_{\text{限}}/R_1)^{1/2} = 65\text{ mA}$ 。

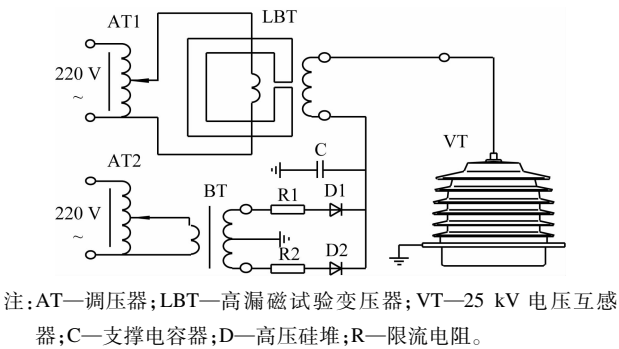
在额定的一次正弦交流电压下,二次侧的励磁电流典型值为  $100\text{ mA}$ 。按电压比为  $25\text{ kV}/150\text{ V} = 166.67$  计算,在接有  $10\text{ VA}$  二次负荷情况下,一次侧的励磁电流典型值仅为  $1\text{ mA}$ 。按  $R_1 = 37\text{ k}\Omega$  计算,则电阻压降不超过  $50\text{ V}$ ,电阻发热不超过  $50\text{ mW}$ ,引起的温升不超过  $1\text{ °C}$ 。可见,在额定一次正弦交流电压下,25 kV 电压互感器的实际温升是很低的。

当一次电压含有直流分量时,一次侧的励磁电流会相应增加,但只要磁通密度未进入铁心磁化曲线的饱和区,励磁电流的增加就不显著。一旦直流磁通密度达到铁心磁化曲线的饱和点,励磁电流的交流分量就会十倍百倍地增加。这个临界点同电压互感器的一次绕组匝数、铁心平均磁路长和材料磁化参数等有关。以 Z11 铁心材料为例,其典型饱和磁通密度为  $1.8\text{ T}$ ,对应的磁化强度  $H = 270\text{ A/m}$ ,当平均磁路长度为  $0.7\text{ m}$  时,励磁磁势  $E_M = 189\text{ A}$ ,一次绕组  $50\text{ 000}$  匝时励磁电流为  $3.8\text{ mA}$ ,一次绕组直流电阻为  $37\text{ k}\Omega$  时的电阻压降为  $140\text{ V}$ 。如果在电压互感器的一次绕组同时施加  $25\text{ kV}$  交流电压和  $140\text{ V}$  直流电压,则波形图上的一次电流基线大致在直流电流水平,而在与直流电流方向一致的半波区间,交流励磁电流的幅值显著超出正

常交流励磁电流幅值。在与直流电流方向相反的半波区间,由于交流励磁电流的幅值小于直流励磁电流值,总的励磁电流只略低于励磁电流基线。于是在示波图上,励磁电流表现为半波脉冲。

2.2 电压互感器直流偏磁试验结果

25 kV 电压互感器的直流偏磁试验线路如图 3 所示。直流偏磁试验结果如表 1 所示。在  $T_1 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,实测一次绕组直流电阻为  $25\text{ k}\Omega$ ,每个试验点试验时间控制在  $1\text{ min}$  之内,试验期间保持直流电压不变,且忽略试验时绕组的温升。直流励磁电流通过直流电压控制,按欧姆定律计算,分别选取  $0、5、10、20、30、40、50、60\text{ mA}$ 。试验时电压和电流的测量误差控制在  $\pm 5\%$  之内。



注:AT—调压器;LBT—高漏磁试验变压器;VT—25 kV 电压互感器;C—支撑电容器;D—高压硅堆;R—限流电阻。  
图 3 25 kV 电压互感器的直流偏磁试验线路  
Fig. 3 DC bias test line of 25 kV voltage transformer

表 1 直流偏磁试验结果						
Tab. 1 DC bias test results						
直流励磁电流 $I_E$ /mA	$I_E$ 有效值/mA	$I_E$ 峰值/mA	$I_E$ 峰值与有效值之比	$U_E$ 有效值/V	$U_E$ 峰值/V	$U_E$ 峰值与有效值之比
0	1.40	4.00	2.9	150.00	430.00	2.9
5	11.00	35.00	3.2	148.00	430.00	2.9
10	17.00	50.00	2.9	146.00	430.00	2.9
20	34.00	80.00	2.4	141.00	430.00	3.0
30	50.00	130.00	2.6	136.00	430.00	3.2
40	67.00	170.00	2.5	131.00	420.00	3.3
50	81.00	200.00	2.5	128.00	410.00	3.2
60	95.00	240.00	2.5	123.00	400.00	3.2

注: $U_E$  为直流偏磁电压。

测量数据表明,当对 25 kV 电压互感器一次绕组施加的直流电压为  $1\text{ }000\text{ V}$  时,直流偏磁电流为  $40\text{ mA}$ ,一次电流有效值为  $67.00\text{ mA}$ 。当线圈温度达温升限值时,对应的直流电压为  $40\text{ mA} \times 37\text{ k}\Omega = 1\text{ }480\text{ V}$ 。可见,温升后的直流电压增量较大。

必须注意到,上述计算是按温升  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  考虑的,

如果运行时的环境温度是  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则允许温升限值只有  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此时  $25\text{ kV}$  电压互感器只能在  $1\text{ }000\text{ V}$  直流偏磁电压下工作。

2.3 电压互感器优化及效果验证

优化后的动车组  $25\text{ kV}$  电压互感器采用了部分气隙铁心设计。铁心有效截面积为  $31.4\text{ cm}^2$ ,平均磁路长  $68\text{ cm}$ ,一次绕组  $75\text{ }000$  匝。 $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (常温)时, $R_1 = 61\text{ k}\Omega$ ;  $T_2 = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, $R_2 = 87\text{ k}\Omega$ ;额定电压比为  $25\text{ kV}/150\text{ V}$ 。

表 2 是优化后电压互感器的直流偏磁试验数据。由表 2 可见,当直流电流为  $40\text{ mA}$  时,一次励磁电流有效值为  $44.30\text{ mA}$ ,对应的直流偏磁电压  $40\text{ mA} \times 87\text{ k}\Omega = 3\text{ }480\text{ V}$ 。注意到二次电压峰峰值与有效值之比始终保持在  $2.8$ 。这意味着这台电压互感器在直流偏磁下的波形失真不显著。从直流电流  $50\text{ mA}$  对应的一次电流数据看,这台电压互感器甚至能在接近  $4\text{ }000\text{ V}$  直流偏磁下工作。

表 2 优化后电压互感器的直流偏磁试验结果  
Tab. 2 DC bias test results of optimized voltage transformer

$I_E$ /mA	$I_E$ 有效值/mA	$I_E$ 峰值/mA	$I_E$ 峰值与有效值之比	$U_E$ 有效值/V	$U_E$ 峰值/V	$U_E$ 峰值与有效值之比
0	1.40	4.00	2.8	150.00	418.00	2.8
5	7.75	16.00	2.1	149.00	414.00	2.8
10	13.80	26.00	1.8	149.00	410.00	2.8
20	23.60	40.00	1.7	147.00	408.00	2.8
30	32.50	55.00	1.7	144.00	402.00	2.8
40	44.30	75.20	1.7	139.00	402.00	2.8
50	57.60	100.00	1.7	133.00	400.00	3.0

优化后的电压互感器样机通过了  $30\text{ 万 km}$  的运行考核,且运行情况仍然良好。目前,按国产化要求制造的该型电压互感器已批量交付相关高铁主机厂装车使用。

3 结语

通过对动车组  $25\text{ kV}$  电压互感器烧损状态的观察和烧损过程的分析,可以认为动车组用  $25\text{ kV}$  电压互感器运行中过热烧损的主要原因是产品没有达到应有的直流偏磁设防水平。

$25\text{ kV}$  电压互感器采用降低磁通密度和增大铁心截面积的方法进行抗直流偏磁设计,要达到直流偏磁电压  $2\text{ }500\text{ V}$  的设防水平相当困难。本文提出  
(下转第 113 页)