

研  
究  
开  
发HXD1B 电力机车用 300 kVA  
辅助变压器研制廖保华<sup>1,2</sup>, 钟福兵<sup>1</sup>, 黄细友<sup>1</sup>

(1. 南车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 北京交通大学, 北京 100044)



作者简介：廖保华（1972-），男，工程师，现从事电力机车牵引变压器产品工艺研发工作。

**摘 要**：HXD1B 电力机车用 300 kVA 辅助变压器是磁集成技术在变压器研制中的具体应用实例。主要介绍了此辅助变压器的主要技术参数、技术特点和结构特点；说明了辅助变压器高阻抗电压、高空载电流特性的结构设计方法；重点介绍了实现干式变压器防水性能的结构设计方法和工艺制造措施，分析了变压器局部放电的产生机理及降低局部放电量工艺措施。通过试验验证了该辅助变压器防水性能和局部放电特性，表明该辅助变压器的设计和制造是成功的。

**关键词**：辅助变压器；高阻抗电压；高空载电流；防水；局部放电；HXD1B 电力机车

**中图分类号**：U264.3

**文献标识码**：A

**文章编号**：1000-128X(2011)04-0017-03

## Research and Production of 300 kVA Auxiliary Transformer Used in the HXD1B Electric Locomotive

LIAO Bao-hua<sup>1,2</sup>, ZHONG Fu-bing<sup>1</sup>, HUANG Xi-you<sup>1</sup>

(1. CSR Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract**: 300 kVA auxiliary transformer used in the HXD1B electric locomotive was specific application examples of magnetic integration technology developed in the transformer. This paper mainly introduced the main technical parameters, technical characteristics and structural features of the auxiliary transformer. High impedance voltage and high no-load current characteristics of auxiliary transformer's structure was pointed out. Structure design method and manufacture process measures of dry-type transformer waterproof properties were emphatically introduced, and the generating mechanism of transformer partial discharge and reducing process measures were analyzed. The auxiliary transformer waterproof performance and partial discharge properties were validated through experiment, which shows that the design and manufacturing of the auxiliary transformer is very successful.

**Key words**: auxiliary transformer; high-impedence voltage; high no-load current; waterproof; partial discharge; HXD1B electric locomotive

### 0 引言

在 HXD1B 电力机车上，辅助设备运行电源系统有恒频、恒压三相电源系统（440 V，60 Hz）和变频、变压三相电源系统（电压 80~440 V，频率 10~60 Hz）。机车辅助设备电源通过辅助逆变器由主变流器中间直流环节提供。辅助逆变器将中间直流环节电压分别转换成具有恒频恒压和变频变压的三相交流电源系统，为机车辅助设备提供电源。

南车株洲电机有限公司自主研发的 HXD1B 机车用 ZPSG-300/1.672 型辅助变压器（以下简称辅助变压器）连接在辅助逆变器与机车辅助设备电源系统之间，与

后面电容器串联构成一个正弦波滤波器，起滤波和变压作用，保护辅助设备不受牵引系统中高压的干扰。

本文重点介绍辅助变压器的主要技术参数、结构特点及关键技术。

### 1 辅助变压器原理图及技术参数

辅助变压器接线原理图如图 1 所示，联结组别为 Dyn5。

辅助变压器主要技术参数如下：

|           |      |
|-----------|------|
| 额定容量/kVA  | 300  |
| 相数        | 三相   |
| 频率/Hz     | 60   |
| 一次侧额定电压/V | 1672 |

收稿日期：2011-02-10

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 二次侧额定电压/V               | 440          |
| 变比                      | 3.8 (1±0.5%) |
| 联结组                     | Dyn5         |
| 冷却方式                    | 强迫风冷AF       |
| 阻抗电压/%                  | 40.5 (1±10%) |
| 漏电感/mH                  | 28 (折算到一次侧)  |
| 空载电流/%                  | 8~13         |
| 负载损耗/W                  | 12310        |
| 空载损耗/W                  | 1020         |
| 辅助变压器二次侧输出电压/频率特性曲线见图2。 |              |

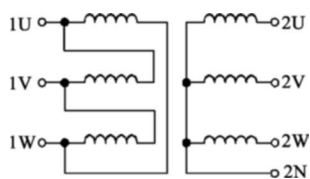


图1 接线原理图

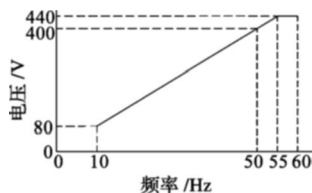


图2 辅助变压器二次侧输出电压/频率特性曲线

## 2 辅助变压器技术及结构特点

辅助变压器主要技术特点如下：

① H 级绝缘浸渍式干式变压器，卧式结构，在HX<sub>D</sub>1B 电力机车的辅助变压器柜内卧式安装。

② 阻抗电压为40.5%，远远高于同电压等级、同容量干式电力变压器4%的阻抗电压值<sup>[4]</sup>。

③ 空载电流为8%~13%，远远高于一般变压器的空载电流百分值（1%~2%）。

④ 防护等级高，产品泡在水中12 h测量高、低压绕组对地绝缘电阻应大于1 MΩ。

⑤ 局部放电量小，一次侧对地5 040 V时，局部放电量小于50 pC。

⑥ 耐冲击电压高，一次侧额定冲击电压为30 kV。

在结构上，辅助变压器采用矩形铁心、矩形绕组。

铁心分为主铁心和副铁心，变压器一次绕组绕在主、副铁心上，二次绕组仅绕在主铁心上。绕组及铁心结构示意图见图3，辅助变压器结构示意图见图4。

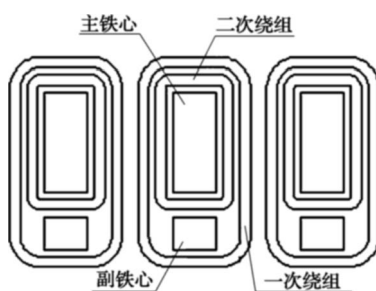


图3 绕组及铁心结构示意图

### 2.1 铁心

铁心分为主铁心和副铁心，铁心硅钢片采用矩形截面。主铁心铁轭与铁心柱之间采用Nomex纸做成的气隙。副铁心采用典型的电抗器铁心结构，用多个铁心饼组合成铁心柱，中间采用Nomex纸做成的气隙。可以通过改变铁心的材料和截面尺寸来调整磁通，通过

调整铁心气隙来精确调整漏感。

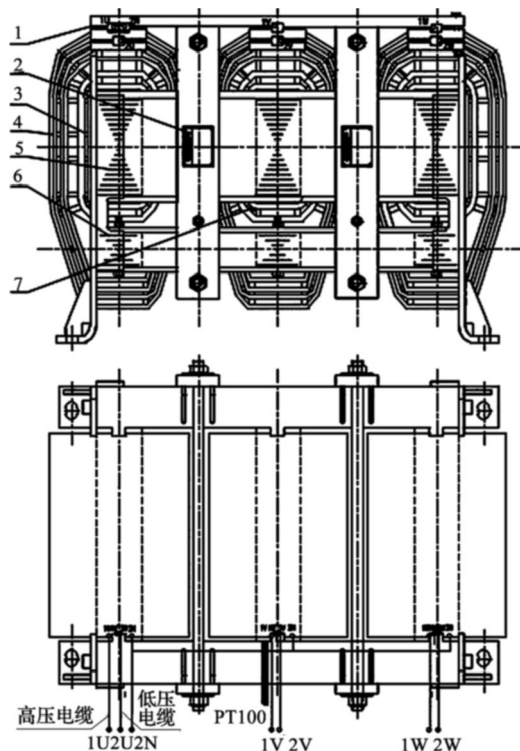


图4 辅助变压器结构示意图

1 ——引线；2 ——铭牌；3 ——二次绕组；4 ——一次绕组；5 ——主铁心；6 ——副铁心；7 ——PT100

为加强产品的机械强度，上、下铁轭各做成一个整体，把主铁心、副铁心连成一个整体。辅助变压器通过多次真空压力浸漆固化后成为一个整体“刚体”结构，大大提高了辅助变压器的机械性能。

### 2.2 绕组

辅助变压器的一次绕组和二次绕组都采用矩形结构，内部二次绕组和外部一次绕组均为多层层式绕组，绕组绕制时采用特殊的不敲不打绕组绕制工艺处理，在组装成辅助变压器整体后再经过多次真空压力浸漆处理，提高浸渍漆的粘度，提高真空度和延长保压时间，使绕组和辅助变压器都具有防水性能，能满足在水里浸泡12 h后的绝缘电阻达到1 MΩ以上的标准。

### 2.3 引线

辅助变压器连接组是Dyn5，引线的制作顺序为先制作好内部导线连接，待变压器整体真空压力浸漆干燥后，再进行外部引出线连接。

内部导线连接时，按照外部引线的布置位置弯制好一次绕组、二次绕组导线出头，然后引入联接铜管中进行压接。

外部引出线连接时，先把外部引出线电缆引入联接铜管中进行压接，然后进行包扎。为有效地防止电晕现象的产生，引出电缆采用瑞士进口的RADOX 9 GKW-AX 牵引电缆，该电缆具有电子束交联结构双阶绝缘层，耐电晕能力强。

### 3 关键技术

#### 3.1 高阻抗电压、大空载电流特性

辅助变压器为一次侧带电抗器的变压器, 阻抗电压为40.5%, 空载电流为8%~13%, 远远高于同容量等级同电压等级的干式电力变压器的阻抗电压(4%左右)、空载电流(2%以下)要求。因此辅助变压器的结构具有特殊性。绕组及铁心结构三维示意图见图5。

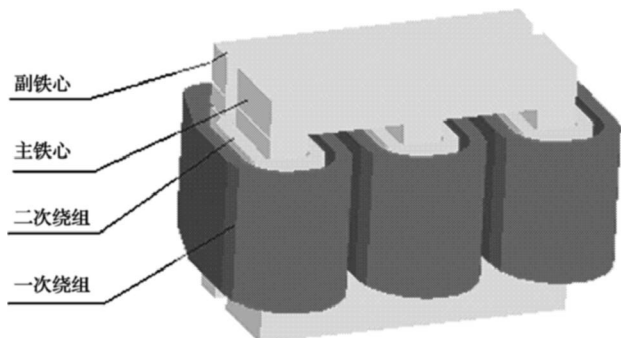


图5 绕组及铁心结构三维示意图

主铁心和副铁心被组合使用, 辅助变压器一次绕组绕在主铁心、副铁心上, 二次绕组仅绕在主铁心上, 使变压器的漏感集中在一次侧, 通过计算主铁心和副铁心中的心柱的大小及气隙厚度可精确确定并控制阻抗、空载电流的大小。

#### 3.2 防水特性

辅助变压器在使用过程中, 如遇下雨天气, 会有雨水通过侧墙过滤器进入变压器器身, 如何保证在雨水淋落到变压器绕组时变压器能正常工作而不发生接地故障是一个关键的技术难点, 没有成熟经验借鉴。对敞开式干式变压器的设计和制造工艺都是非常严峻的挑战, 需要设计和工艺进行多次的试验, 从中找出事物的客观规律。

鉴于该辅助变压器使用环境恶劣, 使用期间常常会遭受雨水、风沙的侵蚀, 因此对产品的防水性能提出了更高的要求。要求辅助变压器整体(含引线)浸入水中12 h后绕组绝缘电阻必须大于1 MΩ。

敞开式(非包封)干式变压器满足浸水试验要求, 国内外无成熟经验可借鉴。为了满足产品的防水要求, 主要从以下几个方面进行处理。

①改进绕组绕制工装, 减小绕组绕制拉紧力, 改进绕组出头弯折部位绝缘包扎工艺, 采用特殊的不敲不打绕组绕制工艺, 确保导线在绕制过程中的质量。

②采用特殊的组装机, 改进器身装配绕组撑紧工艺, 确保绕组在装配过程中不会出现绝缘的破损。

③选用具有防水性能的绝缘包扎材料, 改进变压器引线制作及包扎工艺, 确保引线材料和包扎工艺满足变压器浸水要求。

④采用高性能等级的浸渍漆, 并经过多次真空干燥与真空浸漆工艺验证后完善了浸漆工艺。同时采用

旋转烘焙工艺, 尽量减少变压器在固化过程中漆的流失量及保证漆的均匀性, 进而保证绝缘浸渍漆的整体性能, 提高产品的防潮及整体机械强度。

通过以上设计和工艺处理, 出厂的辅助变压器全部通过了浸水试验。现已装车在线路上运行2年, 没有出现过一次因受潮而导致绝缘电阻降低引起的故障。

#### 3.3 解决局部放电

局部放电对于绝缘的破坏有2种情况, 一是放电质点对绝缘的直接轰击, 造成局部绝缘破坏, 逐步扩大使绝缘击穿; 二是放电产生的热及臭氧等活性气体的化学作用, 使局部绝缘受到腐蚀, 电导增加, 最后导致热击穿。通常, 电气绝缘的破坏或局部老化, 是从局部放电开始的, 局部放电量的大小直接影响变压器的使用寿命。局部放电量愈低, 变压器的运行寿命就越长。

影响局部放电的主要因素: 一是绝缘材料的材质, 二是产品设计的绝缘结构, 三是生产加工制造工艺。变压器中的局部放电源有两大类: 一类是制造和工艺处理后固体绝缘介质中残留的气泡或气隙, 另一类是金属尖端、绝缘内部残留的金属异物。针对辅助变压器的特殊结构, 采用以下几个方面来降低局部放电量。

①提高厂房清洁度, 在各工序中采用特殊制造工艺方法, 确保产品各部件在制造过程中的清洁度, 确保各配件无灰尘、无各种尖角毛刺、无金属粉尘等。

②铁心: 夹件的制造不要有锋边, 注意倒圆角, 焊缝均匀, 焊后去焊渣、尖角、毛刺; 硅钢片剪切时要控制毛刺的产生; 铁心装配前硅钢片及各部件清洁、无金属粉末、无脏物等; 铁心装配时要控制螺栓、螺母等紧固件在装配过程中金属异物的产生, 确保铁心所有金属部件做到一点可靠接地。

③绕组: 首先检查导线、绝缘件等无尖角、毛刺、毛边; 绕制时要绕制紧实, 层间绝缘在安装时必须平整无皱折, 防止绕组内部形成气隙; 换位及出头制作要用专用工装, 防止出现硬弯或直角弯而出现毛刺、尖角; 绕组暂停绕制或绕制完成后注意防尘保存。

④总装: 要保持清洁, 不要让金属颗粒、灰尘混入变压器绕组中; 绕组装配要按图居中装配, 使绕组到上、下铁轭的距离相等, 装配用的撑条要圆角, 不允许挤破绕组的绝缘, 撑条的位置按要求两端都不要碰铁轭, 绕组的层绝缘两端也不要碰到铁轭, 暂停装配或装配完成后注意防尘保存, 装配完成时用吸尘器清洁灰尘、异物等。

⑤引线: 引线装配最重要的是控制引线接头和屏蔽质量。引线外表光滑, 引线接头处联接可靠, 避免引线的尖角毛刺引起的电场集中现象。引线的压接处要将所有的细铜绞线全部塞入过渡铜管, 铜管内部的间隙要用不同规格的扁铜线或圆铜线填充; 引线的焊接处要除去已烧焦、碳化的绝缘残留物, 同时焊缝要均匀, 焊后先用挫刀挫去尖角、毛刺, 然后(下转第65页)

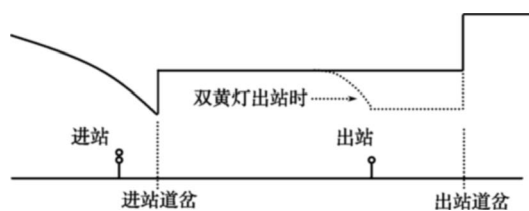


图3 侧进正出股道控制曲线

由图3可见,当进站存在迂回进路或咽喉区过长时、出站存在迂回进路时,均存在道岔区超速的安全隐患。

## 2 特殊股道信息数据的编制方法

严格按照LKJ数据文件编制规范对侧线股道信息数据编制的规定,结合沈阳铁路局各站特殊股道的具体情况,确定特殊股道信息数据编制方法如下:

### 1) 进岔限速低于出岔限速的侧进侧出股道

编制此类股道信息数据时,需首先计算进站经由岔区的长度。如进站岔区长度大于250 m时(考虑列车加速需走行一定距离,放宽50 m,下同),出岔限速按进岔限速编制,确保进站岔区限速控制安全。

### 2) 进岔限速高于出岔限速的侧进侧出股道

编制此类股道信息数据时,需首先查看出站进路。如出站存在迂回进路或出站经由多组道岔时,进岔限速按出岔限速编制,确保出站岔区限速控制安全。

### 3) 侧进正出股道

①出站无迂回进路。编制此类股道信息数据时,需首先计算进站经由岔区的长度。如进站岔区长度大于50 m且小于250 m时,取消“侧进正出”选项,出岔限速按衔接正线线路限速编制;如进站岔区长度大于250 m时,取消“侧进正出”选项,出岔限速按进岔限速编制。这样可确保进站岔区限速控制安全。

②出站存在迂回进路。按照LKJ数据文件编制规范中“5.2.7侧进正出:选中该项时,表示列车经由道岔侧向进站、正向出站,如正向出站股道限速有特殊规定的不得选中此项”的规定,编制此类股道信息数据时,不得选中“侧进正出”选项,即按侧进侧出股道进行编制,特殊编制方法见上述第1)、第2)项。

## 3 结语

该特殊股道信息数据编制方法在沈阳铁路局推广使用后,使LKJ控制模式符合故障导向安全的原则,从根本上防止了列车经由特殊股道走行时的超速问题,在实际运用中取得了良好的安全隐患防控效果。

### 参考文献:

- [1] 解宗光,等. 关于发布《列车运行监控装置(LKJ)数据文件编制规范(V2.0)》的通知[S]. 北京:中国铁道出版社,2009.
- [2] 杨志刚. LKJ2000型列车运行监控记录装置[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.

(上接第19页) 用砂纸打磨出亮光,最后在引线的压接处和焊接处的外周均匀包锡箔纸,再按要求包好绝缘纸,锡箔纸和绝缘纸包扎紧实,防止出现折叠,避免电极上出现尖角。

⑥浸漆:加强真空浸漆处理工艺,掌握好浸漆处理工艺的各项细节。漆的清洁度、漆的粘度、浸漆时间、真空度、滴漆时间、干燥时的升温时间、固化时间等要严格控制好。尽量使漆膜均匀、光滑,一定不能在漆膜内形成气泡。

试验方法按DIN VDE 0110-20第4.4.1项的直接加压法确定局部放电的起始电压和终止电压。局部放电的

表1 局部放电测量数据

| 试验加压及局放测量端子     | 频率/Hz | 局部放电量/pC | 放电终止电压实测/V | 放电终止电压标准/V | 备注                   |
|-----------------|-------|----------|------------|------------|----------------------|
| 一次侧绕组1U、1V、1W端子 | 50    | ≤50      | 7 000      | ≥5 040     | 二次侧绕组2U、2V、2W端子短接并接地 |
| 二次侧绕组2U、2V、2W端子 | 50    | ≤50      | 2 400      | ≥1 000     | 一次侧绕组1U、1V、1W端子短接并接地 |

测量数据如表1所示。试验结果表明,该产品的局部放电试验数据完全符合产品性能要求。

## 4 结语

该辅助变压器通过采用将变压器和电抗器集成在一起组成磁集成变压器的磁集成技术来实现高阻抗电压,通过调整铁心气隙的大小来实现大空载电流,通过特殊的结构和工艺设计,达到结构紧凑、重量轻、体积小、防水性能好、局部放电量低等特点,还具有很好的突发抗短路能力、降低噪声等优点。

该辅助变压器现已在线路上运行两年多,质量稳定,说明此辅助变压器设计和制造是成功的,并为今后同类产品设计及制造奠定了坚实的基础。

### 参考文献:

- [1] 陈乾宏. 开关电源中磁集成技术及其应用[J]. 电工技术学报,2004(3).
- [2] 李建明,朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [3] IEC60310:2004,机车车辆牵引变压器和电抗器[S].
- [4] GB/T10288:1997,干式电力变压器技术参数和要求[S].