

# 电力机车主变压器绕组短路保护策略研究

麻艳辉

国家能源集团新朔铁路机务分公司运转车间

DOI:10.12238/jpm.v3i11.5455

**[摘要]** 主变压器作为铁路电力机车上重要的供电设备, 它的安全可靠对于保障电力机车的正常运行有着重要作用。研究并建立电力机车主变压器故障诊断系统, 帮助检修人员快速有效地诊断主变压器的故障并制定故障处理的方案, 有利于降低主变压器在运行中发生故障的可能性, 对于保障铁路运输的安全有着重要意义。

**[关键词]** 励磁涌流; 绕组短路; 瞬态保护; 稳态保护

## Study on Short Circuit Protection Strategy of Main Transformer

Ma Yanhui

Unit: Operation workshop of Xinshuo Railway Locomotive Works Branch of National Energy Group

**[Abstract]** As an important power supply equipment on the railway electric locomotive, its safety and reliability plays an important role in ensuring the normal operation of the electric locomotive. Study and establish the fault diagnosis system of the main transformer of the electric locomotive, to help the maintenance personnel to quickly and effectively diagnose the failure of the main transformer, and to formulate the fault treatment scheme, which is conducive to reducing the possibility of failure of the main transformer in the operation, and is of great significance to ensure the safety of railway transportation.

**[Key words]** excitation surge flow; winding short circuit; transient protection; steady-state protection

随着我国铁路运输事业不断发展, 传统的主变压器故障诊断方法已经不能很好地满足铁路机务生产现代化建设的需要。电力机车主变压器作为电气系统的核心部件, 起着连接接触网高压网络和变流系统中压网络的纽带功能。主变压器一般包括一个高压绕组和多个牵引绕组、辅助绕组和电抗器等部件, 高压绕组直接与接触网相连, 牵引绕组直接与变流器连接, 绕组数量多、外部电路结构复杂。变压器原边绕组或牵引绕组短路故障都会给变压器和机车带来巨大危害, 对此在机车设计中需要细致分析和预判, 设计合理的保护策略。电力机车主变压器绕组短路保护设计方法各有差异, 常见设计是原边侧和牵引绕组侧布置电流传感器或互感器进行电流检测, 通过硬件保护或牵引控制单元计算后进行软件保护。

### 一、电力机车主变压器的特点

电力机车主变压器的组成部分主要包括: 变压器器身、出线装置、冷却装置、保护装置以及油箱五个部分, 其中变压器的器身主要由铁芯、绕组和绝缘材料组成, 并且变压器的器身全部浸没在充满变压器油的油箱中, 以实现充分冷却。作为变压器中最关键的部件, 变压器绕组(线圈)被绝缘木、绝缘纸、绝缘漆和捆扎布等绝缘零件固定在主变压器内部, 而这些起固

定作用的绝缘零件又被统称为固体绝缘材料。由于电力机车主变压器所处的运行环境比较特殊, 因此它还具有与一般电力机车变压器不同的特点。当变压器运行在额定工况下时, 变压器的稳定性较高且流过绕组的是正弦电流。当收到短路冲击时, 流经绕组的电流会瞬间激增数倍, 绕组在短时间内受到短路电流的冲击。不同短路工况类型的短路电流大小也是不同的, 因此需要以变压器最恶劣的短路类型为基准去校验变压器的稳定性, 若在此情况下变压器依然能够稳定运行, 则变压器的抗短路能力能够达到运行标准。因此对短路电流进行计算从而确定短路突发时最恶劣的情况是很有必要的。主要包括以下几个方面:

(1) 目前, 我国的电力机车主变压器都是单相多绕组变压器, 但是一般电力机车变压器主要为三相变压器。

(2) 电力机车在铁路上高速运行时, 会不可避免的伴随着较强的机械振动, 因此电力机车主变压器在运行时会受到频繁的机械振动冲击。

(3) 虽然电力机车的额定工作电压为 25kV, 但是接触网提供的电压波动范围在 20~29kV, 峰值电压甚至可以达到 31kV, 电压偏差到达了 -20%~+16%, 这远远大于我国电力输送网络

的电压波动范围(大约为 $\pm 5\%$ ),所以电力机车主变压器需要承受更大的电压冲击。

(4)在电力机车通过牵引分相区时,会出现电力中断以及电源相位的变化,从而导致激磁电流迅速增大,所以电力机车主变压器通常采用气隙铁芯来降低漏抗。

(5)电力机车主变压器产生的电流中含有较大的高次谐波分量,增加了主变压器的铁芯损耗,从而引起主变压器温度的升高并加速绝缘材料的老化。所以,为了降低铁芯损耗,主变压器的铁芯比一般电力机车变压器的铁芯具有更低的最大磁密度。

(6)电力机车在不同的牵引速度、牵引质量以及牵引区段运行时,主变压器的输出功率变化较大并且波动比较频繁,而一般电力机车变压器的输出功率则相对稳定,所以不能简单地套用一般电力机车变压器运行时间的计算方法来衡量电力机车主变压器的工作寿命。

(7)由于电力机车车体内的空间有限,因此大大限制了主变压器的外形尺寸以及冷却装置的安装,从而使得主变压器拥有的散热条件较差。

综上所述,虽然电力机车主变压器和一般电力机车变压器有着一样的工作原理,但是由于电力机车主变压器运行在更为恶劣的工作环境中,而且经常受到过压、过流以及机械振动的冲击,因此其更容易提前出现故障,而且故障的发展速度也更快。

## 二、电力机车主变压器故障分类

根据故障发生部位的不同,电力机车主变压器的故障一般可以分为内部故障以及外部故障两种类型,其中内部故障是指发生在油箱里面的故障,比如绕组故障和铁芯故障等,而外部故障是指发生在绝缘套管及其引线上的故障,比如绝缘套管破碎、接地等。其中,内部故障是本文的主要研究对象。根据《导则》,按照故障性质的差异,电力机车主变压器的内部故障又可分成热性故障以及电性故障。按照故障严重程度的高低,热性故障可以分成 $150^{\circ}\text{C}$ 以下轻度低温过热、 $150\sim 300^{\circ}\text{C}$ 低温过热、 $300\sim 700^{\circ}\text{C}$ 中温过热和 $700^{\circ}\text{C}$ 以上高温过热,而电性故障可以分为局部放电、火花放电(低能放电)和电弧放电。另外,还包括低能放电兼过热、电弧放电兼过热两种情况。

变压器内部故障分类

过热性故障	放电性故障	放电兼过热故障
150℃以下轻度低温过热	局部放电	低能放电兼过热
150~300℃低温过热	低能放电	电弧放电兼过热
300~700℃中温过热	电弧放电	
700℃以上高温过热		

通常情况下,根据主变压器的故障类型可以粗略地分析出故障发生的原因和部位。对于过热性故障,主要是由于载流导线和接头不良所引起,比如分接开关接触不良、引线导头虚焊、线圈匝间短路或者引线过长等原因。除此之外,比如铁芯多点接地、铁芯片间短路等磁路故障也会引起主变压器过热。对于

电弧放电故障,大多是由于线圈匝间发生绝缘击穿现象、引线断裂以及过电压等原因所导致的。对于低能放电,在电场不均匀或者存在感应电位的情况下都有可能发生,比如不同电位的导体之间、绝缘体之间等。对于局部放电,主要是由于固体绝缘的尖端以及油中气泡因电场集中所引起。可见,根据故障的性质对主变压器的故障类型进行划分,不仅有助于检修人员分析故障的严重程度,而且也可以确定故障产生的原因和部位,有利于故障处理措施的制定。

## 三、提高电力机车变压器绕组抗短路能力的措施

当变压器因绕组短路故障而受到冲击时,短时间内绕组产生大量的热,会对绕组的绝缘性能造成一定的破坏,多次短路后绕组失去绝缘性,导致变压器稳定性下降。由于短路电流会在很短的时间内变化数倍,以至于变压器绕组承受的载荷会远大于正常工作情况下绕组所承受的载荷,严重时会使变压器绕组发生变形。当变压器负载阻抗为零时,变压器内部的等效阻抗被称为短路阻抗,短路阻抗是鉴定变压器受到短路冲击或者外界扰动后,检查其绕组是否变形最直接的判据,对于判断变压器能否再次投入运行有重要的意义。由于电力机车变压器在受到短路冲击后,其绕组会承受巨大的短路力,严重的可以造成绕组的损坏影响电力系统运行稳定性,因此根据上述分析,提出几个变压器抗短路变形能力的措施:

(1)提高系统的监测能力。电力机车变压器发生短路故障时,暂态短路电流的最大峰值将会达到正常运行状态下工作电流的10~30倍,同时电力机车变压器绕组所处的漏磁场也会在瞬间增大数倍,这将会导致电力机车变压器绕组在短暂的时间内所受到的短路电动力达到正常运行工况下的成百上千倍。这种暂态过程的持续时间虽然比较短,通常只有0.15s左右,但当电力机车变压器绕组受到如此巨大的短路冲击力作用时,电力机车变压器绕组线圈很有可能在短暂的时间内发生变形、移位、绕组的匝绝缘脱落甚至绕组导线由于受到短路冲击而被拉断等事故。变压器在网运行时发生短路故障是无法避免的,提高对在运行变压器的检测效率,及时对系统中的短路故障进行检修,避免自动重合闸后短时间内短路冲击对变压器绕组进行多次累计伤害,进而使电网系统出现中断运行造成重大经济损失。

(2)通过对漏磁场分布规律的分析以及电磁载荷的形成原因,可以在今后变压器的设计中,合理地安排安匝分布,适当减小漏磁密数值,从而减小漏磁作用在绕组上产生的电磁载荷。电力机车变压器的结构和绕组形式的不同会影响绕组主空道中漏磁场的分布,处于变压器绕组主空道不同位置的漏磁场分布是不同的,并且漏磁大小随着绕组中电流的变化而变化,当绕组中流过短路电流时,突变的电流会使绕组空间漏磁场的分布发生较剧烈的变化,影响着变压器绕组上受力的大小,影响着变压器运行的稳定性,因此分析变压器绕组主空道的漏磁场时,对模型的准确建立有一定要求,精准模型会使漏磁场的分析更接近实际值。因电力机车变压器整体结构比较复杂,

各个结构对其主空道漏磁场的大小和分布都有一定的影响,在进行使用三维有限元软件对其进行漏磁场计算时,可以对变压器不同部件进行合理简化,这样也简化仿真计算的过程,减少仿真计算的时间,从而提高仿真计算效率。根据变压器绕组及其结构对漏磁场的分布规律,过滤可能会存在影响,对本电力机车变压器的铁心、高压绕组、中压绕组、上下夹件及拉板等部件进行模型上的简化短路电流与变压器短路阻抗呈反比关系,而漏磁场与短路阻抗呈正比关系,因此在变压器设计时需考虑短路阻抗对抗短路能力的影响。

(3)当变压器发生短路时,冲击电流会比正常时的额定电流大几十倍,在从冲击电流和漏磁场的共同作用下,会使变压器内外绕组线圈上受到非常大的短路冲击力,当变压器的抗短路力强度不足以满足短路冲击力的要求时,就会使变压器内外线圈绕组因受到冲击力而发生不规则的轴向变形和径向变形。变压器短路阻抗的变化与变压器绕组之间的漏磁场的变化有非常大的关系,首先需要进行漏磁场和短路电流的计算。通过对变压器绕组主空道漏磁场及绕组所受电磁载荷的分析,在对三相三柱箱式电力机车变压器生产时,提高变压器结构件的加工工艺和装配工艺。当绕组线圈中通过电流时,变压器绕组线圈会在其所占空间位置及其之间的漏空道中产生漏磁,当变压器处于运行过程中时绕组端部的漏磁通会发生弯曲,因此变压器的主空道漏磁又可以分解为轴向漏磁分量和径向漏磁分量。当变压器绕组发生短路,冲击电流与轴向漏磁相互作用会产生径向力作用在绕组线圈上,与径向漏磁相互作用会产生轴向力作用在绕组线圈上。如果短路冲击电力在绕组上造成的短路冲击力超过绕组受力的屈服强度,则会使变压器绕组发生垮塌或者扭曲变形。应着重关注 B 相绕组的支撑能力,与撑条接触的绕组应当增加绝缘厚度,防止绝缘破裂造成故障。将铁心窗外部绕组端部及铁心轭下绕组中部的部分线饼捆绑加固为一个整体,这能大幅增加绕组的稳定性。

不同类型的短路电流大小是不同的,在电力机车变压器短路时所产生的漏磁场大小也是不同的,因此需要以电力机车变压器受到最恶劣的短路电流的类型为基准去校验其运行的稳定性,若在最恶劣的情况下依然能够稳定运行,则电力机车变压器的抗短路能力能够达到运行标准。因此对短路电流进行计

算从而确定短路突发时最恶劣的情况是很有必要的。

#### 四、结语

铁路运输作为我国客货运最常用的方式,有着安全、高效以及运载能力大的优点,极大地方便了货物的运输和人们的出行。因此,我国一直都在大力推动铁路运输事业的发展,并且已经取得了巨大的进步,例如在重载运输、高速铁路、工程建设、机车车辆等领域取得了一大批创新性成果,甚至部分铁路技术已经达到了世界领先的水平。而在牵引技术方面,我国已经基本掌握了电力机车以及动车组的相关核心技术,并在某些方面创造出了具有中国特色的发展模式。其中,由我国引进并且逐渐实现国产化的和谐电力机车(简称HXD),已经成为了我国铁路运输的主力机型之一。在铁路机车牵引技术不断提高的同时,铁路牵引机车也变得更加地复杂化、大型化、精密化和自动化,而且由于铁路运输需求的不断增长,我国铁路机车的数量也在不断地增加。所以,提高机车整备、检修的效率和质量,保障机车安全可靠地运行,成为了铁路机务部门主要的工作目标。主变压器(又称牵引变压器)作为电力机车供电系统中非常重要的设备之一,它的作用是将接触网提供的25kV高压电转换成满足电力机车正常运行所需的低压电。如果主变压器在运行中出现故障,将有可能造成电力机车停运甚至发生事故。所以,及时有效地发现和排除主变压器中存在的故障,对于保证电力机车的正常运行非常重要。

#### [参考文献]

- [1]王万超,李岩.多次短路冲击下变压器绕组轴向模态分析[J].变压器,2017,54(6):6-9.
- [2]鲁非,金雷,刘思维,等.基于有限元分析的电力机车变压器绕组故障诊断[J].高压电器,2018,54(1):123-130.
- [3]樊运新,张彦林,颜昱.电力机车网侧电流保护系统的设计[J].电力机车与城轨车辆,2008,(2):15-17.
- [4]姜晓峰,何正友,胡海涛,等.高速铁路过分相电磁暂态过程分析[J].铁道学报,2013,(12):30-36.
- [5]赵元哲,李群湛,周福林,等.电力机车变压器励磁涌流及其影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,(3):25-34.