

HXd2C 型机车牵引电机定子绕组 接地故障原因分析

曲素荣¹, 李霞²

(1. 郑州铁路职业技术学院 电气工程学院, 河南 郑州 451460;
2. 中国铁路郑州局集团有限公司 洛阳机务段, 河南 洛阳 471002)

摘要:介绍了一起 HXd2C 型机车 YJ170A 型异步牵引电机运用中发生牵引电机转子导条断裂引起定子绕组接地的故障。结合牵引电机结构和设计理论, 从牵引电机启动受力和制造工艺等方面进行了故障原因分析, 提出了可能发现转子导条断裂故障的相关诊断和检测方法。提出在 C4 修和 C5 修的电机检查阶段增加测量电机绕组三相电感不平衡度的措施, 从而可以在早期发现此类故障; 同时对其制造、焊接工艺提出改进意见和措施, 以避免此类故障发生。

关键词: HXd2C 型机车; 牵引电机; 转子导条断裂; 定子绕组接地; 故障诊断

中图分类号: U264.1⁺3; U269.6

文献标识码: B

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.06.036

0 引言

HXd2C 型机车为大功率交流传动电力机车, 配备 YJ170A 型异步牵引电机。自 2016 年以来, 洛阳机务段已出现了 3 起牵引电机转子导条断裂现象, 分别造成轴承报警、定子接地等故障, 文中将介绍其中一起造成定子接地的故障。2017 年 11 月 15 日, HXd2C 0035 机车以 66~68 km/h 速度运行时, 故障显示屏报第 5 位电机“CI5 接地, CI5 再生失效”。机车回段后, 检查测量电机对地绝缘电阻正常, 没有接地现象; 冷态电阻值正常, 但牵引电机绕组三相电感不平衡度达 8.4%, 是其他正常牵引电机绕组电感不平衡度(平均小于 2%)限值的 4 倍多。该电机于 2010 年 11 月 17 日制造出厂, 2014 年 4 月 17 日进行二年检, 总走行里程为 909 595 km, 检修后走行里程为 471 032 km, 该电机于 2017 年 12 月返厂拆解。

1 故障调查和原因分析

1.1 电机解体情况和故障外观分析

2017 年 12 月 18 日, 电机解体时发现电机内部定子绕组边缘有磨损、有 1 根转子导条断裂上翘, 如图 1 所示。



(a) 定子非传动端线圈示意图



(b) 断裂、上翘、过热的转子导条示意图

图 1 HXd2C 0035 机车第 5 位电机解体图

电机拆解完成后, 电机端盖、轴承、传动端齿轮均正常, 轴承油脂颜色正常, 发现转子导条焊接处开裂、翘起, 定子出槽口部位绝缘扫膛式划伤, 绝缘破损。初步分析认为, 造成该电机故障的原因是转子导条与端环部位存在原始焊接缺陷; 电机运行一定时间后, 缺陷逐渐发展, 随着导条温度的升高, 导条上有缺陷的部位受力不均, 加上电机运行过程中的振动等因素, 造成导条产生裂纹, 有裂纹的导条在大电流作用下出现烧损。

一根导条烧损会导致旁边的导条电流加大,造成扩大性过热烧损,发展下去会产生更多的导条断裂。

从图 1(b)可明显看出,断裂导条已经上翘,是划伤定子绝缘和导致电机定子接地的直接原因。

1.2 故障原因分析

1.2.1 定子和转子结构特点

HXd2C 机车上的 YJ170A 型异步牵引电机的定子绕组为双层成型绕组,每个绕组由漆包电磁线绕成。线圈匝间垫有绝缘体,对地用云母和聚酰亚胺薄膜作为主绝缘,绕组成型后嵌进定子槽中。定子绕组用端箍固定以达到足够的机械强度,定子连线后进行整体真空压力浸漆,整个电机绝缘等级为 200 级。定子铁心由冷轧硅钢板叠压,由筋板与两端压圈焊接成为一个整体。

HXd2C 机车上的 YJ170A 型异步牵引电机的转子采用铜条鼠笼式结构,导条与端环采用整体感应焊接,但没有护环。转子铁心由冷轧硅钢板叠压而成,转轴的材料为优质合金锻钢。为了改善转子的散热,转子压圈和冲片上开有通风孔。

转子的日常保养步骤:①检查有无转子导条的松动,检查短路环、保持环的裂纹及损伤;②检查各紧固螺栓有无松动。

1.2.2 转子导条断裂原因分析

根据牵引电机的结构特点,从受力方面对转子导条断裂进行分析。一方面,电机在启动时,转子槽漏抗在槽高位上是不均匀的,越是接近槽底槽漏抗越大,因此将很高的启动电流挤向导条上部,使导条上部产生电热损耗,引起发热,造成导条上下温度严重不均。当导条弯曲变形受到不完全约束时,在导条末端就会引起应力;另一方面,电机在启动时,转子导条电流很大,会产生一个将导条推向槽底的电磁力,而电机启动接近结束时,导条会受到径向的离心力。所以,牵引电机转子导条受力而断裂与电机启动情况有关。

从制造、工艺方面深入分析,转子导条断裂一般有以下几个原因:①导条端环结构不合理。端环为整体,笼条与端环采用刚性连接,对单根笼条而言,不能自由伸缩,易在焊接处产生应力集中。②导条焊接工艺不良,其热应力很容易造成在端环处断条。③导条在铁芯槽内压接不紧,运行中在离心力作用下窜动较大。④制造或修复焊接时温度、时间控制不均匀,热应力不均匀造成应力大的笼条拉断。⑤电机频繁启动。导条在频繁启停过程中反复进行加热和冷却,使导条交替受力,极易被拉断或胀鼓与定子摩擦断裂。

和谐型机车牵引电机转子普遍采用电阻温度系数较小的专用铜合金导条和锻纯铜端环,在制造中采用转子整体感应焊接新工艺。感应焊接是目前世界上最清洁环保的加热焊接方式。但作业过程的任何一个环节出现疏漏都会留下焊接缺陷。HXd2C 0035 机车的电

机转子导条端部明显开焊,造成了局部断裂,明显是焊接缺陷造成的故障。

2 改进措施及建议

2.1 增加检修内容

在机车 C4 修和 C5 修中增加检修内容,及时发现牵引电机转子导条断裂的隐患。

机车牵引电机转子断条故障将导致电机运行性能恶化,该情况一旦发生,不仅会损坏电机本身,而且会影响机车安全运行,甚至会危及人身安全。所以早期发现并修复这种故障是非常必要的。

目前对牵引电动机定子转子相关检测过程中,C4 修时牵引电机不解体。C5 修中牵引电机解体前,需检查基本外观、听转子声音等;检测内容为定子绕组线电阻、冷态绝缘电阻、交流对地耐压;解体后转子检修主要检查转轴、封环、平衡块、端环、支架不得有裂伤变形及松动;对轴锥面等做探伤检查;重新喷表面漆、重新做动平衡检验;组装后进行振动检测。

分析上述检查检测过程,缺少发现关于 HXd2C 机车牵引电机转子导条焊接隐患的手段,甚至转子断条也容易被忽略。此次采用的查找故障方法为纯电感检测法,该方法能准确判断电机故障点是存在于转子还是存在于定子,同时从电阻、电感的测量结果推测转子导条可能存在的缺陷。依据检测结果,需提醒运用部门时刻加强电机运用监控。导条断裂的表现形式多样,当发现电机有温升大、异音、振动明显变大时,应立即对电机进行检查测量,防止故障扩大。

2.2 探索故障诊断方法

电机制造部门和 C5 修基地需探索转子缺陷故障诊断方法。

基于电磁原理,当转子导条发生断条或端环开裂时,转子绕组会引起磁通不对称现象。当电机外施电压时,定子三相绕组合成磁势产生的气隙磁势,除出现正转分量以外还会出现反转分量。由于产生的反转气隙磁势分量会在定子绕组中产生同频率电流分量,这是转子导条故障诊断的依据。转子故障的检测诊断方法有多种,如磁通检测法、定子电流检测法、机械信号检测法、温升检测法、三相电感测量法等。这些方法对机车牵引电机故障检测判断来说各有利弊。

1) 定子电流法

在故障发生初期,通过分析转子断条很难提取到故障特征信号。HXd2C 型机车运用时的电机电流无法在线跟踪,只有在明确故障时才记录电流值,所以在轴承报警时未记录电流值,而在定子接地瞬间记录的电流值已经不能反映故障早期出现时的情况。

2) 温升检测法

温升检测法是从转子中提取故障特征信号,通过分析电机在转子断条故障时各导条电流和温升的分布

规律来检测转子故障，不仅能准确判断电机是否存在转子断条故障，而且还能判断出转子故障的程度，这是定子电流检测法难以实现的。为了能利用导条温升的不平衡来检测电机转子断条故障，则必须有在电机运行时可靠检测转子温升的方法。但由于以前的技术限制，很难在电机运行时获得有关转子的温升信息，特别是检测整个转子铁心的温升分布或最热点温升，另外安装测量元件也比较困难。

3) 输出功率检测法

通过判断电机输出功率信号中是否有余弦分量来判断转子是否有断条故障，但该方法无法判断故障的严重程度。

4) Park 变换法

将定子三相电流放在 dq 坐标系中，正常 i_d 和 i_q 形成的矢量轨迹为一个以原点为中心的圆，而转子断条时矢量轨迹不再是一个圆，据此可检测故障。但该方法是基于电流检测，用来预测早期故障比较困难。

5) 三相电感测量法

用定子三相绕组电感不平衡的方法来判断导条是否断裂。基于磁场变化引起的电感不均衡，在导条烧损初期表现不明显。该方法是机务段目前常用的检测方法。

对以上几种方法进行比较，如表 1 所示。

表 1 交流牵引电机转子导条断裂的测量方法的优缺点

方法	优点	缺点
定子电流法	可在机车软件系统设计中加上电流参数，定期下载分析	转子断条故障发展初期很难提取故障特征信号；在机务段无法进行线检测
温升检测法	能较准确判断电机是否存在转子断条故障，而且还能判断出转子导条断裂的故障程度	机务段无法进行，但电机制造厂可预先安装传感器，通过 CMD 数据快速发现故障
输出功率检测法	能准确判断电机是否存在转子断条故障，而且能判断出转子导条断裂故障的程度	机务段无法进行检测
Park 变换法	用定子三相电流矢量轨迹能准确判断电机转子断条故障，也能判断出转子导条断裂的故障程度	预测早期故障比较困难，在机务段无法进行，电机制造厂可以应用
三相电感测量法	简单可行，是机务段目前的通用检测方法，有故障时进行测量	

尽管 HXd2C 型机车牵引电机发生此类故障的情况不多，但是可以分析得知此类电机在制造和工艺上存在的缺陷和隐患，电机制造厂和 C5 修部门应高度重视此类故障，探索科学实用的转子缺陷故障诊断方法。可以在电机解体前用温度测量法和 Park 变换法结合，综合分析判断；解体后重点检查，把故障隐患消灭在出厂前。在本次故障中，电机绕组三相电感不平衡度达 8.4%，是其他电机绕组电感不平衡度（平均小于

2%）限值的 4 倍多，说明故障已经发展到了较严重的地步。这给检测判断此类故障提供了实践依据，因此建议 C4 修的检查 and C5 修解体前检查项目要增加对电机绕组电感不平衡度的测量。

2.3 严格控制转子焊接工序

电机制造厂应在 HXd2C 机车牵引电机转子上加装护环，并严格控制转子焊接工序。

①对转子焊接的特殊工序进行监控。严格执行工艺，重点加强焊前对端环导条的清理，保证导条、端环焊接部位和钎料的清洁度，安装时保证导条在铁心槽内压接紧密，并进行必要防护，进而保证转子焊接质量。同时注意温度、时间控制均匀，防止因热应力不均造成应力大的导条被拉断。

②提高助焊剂涂装时容器、工具和作业环境的清洁度，防止异物混入。在牵引电机检修时，按工艺要求，对转子端环圆周面与铁心之间导条的外露可见部分进行着色渗透探伤；特别是对导条两侧面及底部需使用放大镜进行检查，要求不得存在大于 2 mm 的周向线性缺陷或大于 4 mm 的其他非周向缺陷。若不合格，需对转子进行返修处理，更换裂纹导条，重新焊接端环。

③对 HXd2C 机车牵引电机转子加装护环。如果有了护环，即使导条断裂，也不会造成定子接地。

3 结语

HXd2C 型机车牵引电机出现转子导条断裂现象属于比较严重的故障，应引起制造厂商、机务运用和检修部门的高度重视。本文从牵引电机转子受力和制造工艺方面分析了发生故障的原因，得到该型牵引电机在制造或修复焊接时存在某种缺陷。为了早期发现并判断转子导条断裂故障，提出在 C4 修和 C5 修的检修测量项目增加电机绕组电感不平衡度的测量，同时探索避免电机携带潜伏故障出厂的方法。另外提出电机制造厂商应严格控制转子焊接工序，同时对牵引电机转子加装护环，避免发生电机定子接地。

参考文献:

[1] 蒋建东, 蔡泽祥. 基于输出功率的感应电动机转子故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 11-13.

[2] 曲素荣, 索娜. 电机与电力拖动[M]. 4 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.

[3] 许伯强, 李和明, 孙丽玲. 笼型异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 115-119.

[4] 王冰峰, 康波, 吕炳朝. 笼型异步电动机转子故障的温升检测探讨[J]. 中小型电机, 2000, 27(3): 41.

[5] 詹阳, 孔伉伉, 许国瑞, 等. 交流电机转子导条间横向漏电流研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2132-2143.

作者简介: 曲素荣 (1966—), 女, 副教授, 长期从事电机与电力拖动、电机电器与控制及机务运用信息化系统教学科研工作。