

牵引发电机汇流环绝缘结构优化研究

冉继强, 高云霞, 邱 添
(成都中车电机有限公司, 四川 成都 610010)

摘 要: 针对牵引发电机汇流环产品标准化和通用化设计, 列举了 5 种型号的交流传动内燃机车配套汇流环绝缘结构, 提出了汇流环绝缘结构优化的设计方案。检测、试验和有限元分析结果表明, 优化结构满足额定电压低于 1 346 V 的牵引发电机使用要求。这为以后设计不同要求的汇流环绝缘结构提供了参考依据。

关键词: 牵引发电机; 汇流环; 绝缘结构; 优化

中图分类号: U 262.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0072-04

Insulation Structure Optimization for Slip Ring of Traction Generator

RAN Jiqiang, GAO Yunxia, QIU Tian
(Chengdu CRRC Electric Co., Ltd., Chengdu 610010, China)

Abstract: For the product standardization and generic design of slip ring of traction generator, five types of slip ring insulation structures for AC drive diesel locomotive traction generator were introduced. An optimization scheme for the insulation structure of slip ring was proposed. The results of tests, experiments and finite element analysis showed that the optimized structure could meet the requirements of traction generator with rated voltage less than 1 346 V. The reference was provided for the later design of insulation structure of slip ring with different requirements.

Key words: traction generator; slip ring; insulation structure; optimization

0 引 言

内燃机车是列车的牵引动力, 原动机是柴油机, 因具有运载能力强和不依赖电网等优点, 被广泛装机于国内外货运内燃机车和矿山机械行业^[1]。但这 2 个行业国内均出现不同程度的饱和, 随着高铁和电力机车的广泛应用, 内燃机车行业面临国内紧缩和亟待走向海外市场的压力^[2]。表明在高铁和电力机车时代内燃机车行业急需转型升级。

本文主要分析具有中间直流环节的间接变频的交流传动牵引发电机, 其中牵引发电机为连接柴油机和变频器的能量转换元件; 汇流环是连接定子绕组与功率输出的关键部件, 其可靠性直接影响到设备的可靠性。

成都中车电机有限公司(简称成都中车)生产的牵引发电机汇流环绝缘结构众多, 其中运行

时间最早的 CDJF201 系列额定电压最高达 1 248 V^[3], 额定电压最高达 1 346 V 的 CDJF212 系列已有 7 年, 2 种汇流环绝缘结构分别如表 1 方案 3 和方案 5 所示。运行结果表明 2 种绝缘结构均可靠, 方案 3 的缺点是材料种类多、工艺时间太长; 方案 5 则具有良好的工艺性, 可推广应用。因此, 将汇流环绝缘结构标准化和通用化是本文的主要工作。

1 相关背景介绍

牵引发电机是电传动内燃机车上连接柴油机与牵引电动机的能量转换重要部件, 定子上 U、V、W 和 N 环连接电枢绕组输出功率。牵引发电机输出电流大, 一般用多支路并联的结构, U、V 和 W 环处于高电位。

从整流-逆变角度分析, 牵引发电机输出经

作者简介: 冉继强(1992—), 男, 助理工程师, 研究方向为凸极同步发电机机械结构设计、电磁和流体计算。

高云霞(1974—), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为电机绝缘结构设计。

邱 添(1987—), 男, 工程师, 研究方向为电机设计。

表 1 不同时期汇流环绝缘结构统计

方案	零部件名称	绝缘结构	电机额定 电压/V	首台电机 生产年份
1	集流环	聚酰亚胺薄膜 1/2 叠包 2 次,多胶粉云母带 1/2 叠包 2 次,无碱玻璃丝带 1/2 叠包 1 次	613	1985
	三相引出线			
	引线头			
2	集流环	与线圈焊接前:聚酰亚胺薄膜 1/2 叠包 1 次,多胶粉云母带 1/2 叠包 2 次,无碱玻璃丝带 1/2 叠包 1 次;与线圈焊接后:多胶粉云母带 1/2 叠包 3 次,无碱玻璃丝带 1/2 叠包 1 次	770	2004
	三相引出线			
	引线头			
3	集流环	聚酰亚胺薄膜 1/2 叠包 3 次,多胶粉云母带 1/2 叠包 3 次,无碱玻璃丝带 1/2 叠包 1 次	780	2007
	三相引出线			
	引线头			
4	集流环	聚酰亚胺薄膜 1/2 叠包 3 次,多胶粉云母带 1/2 叠包 3 次,无碱玻璃丝带 1/2 叠包 1 次	1 248	2011
	三相引出线			
	引线头			
5	集流环	中胶云母带 1/2 叠包 2 次,云母带绕包结束处用玻璃丝带包扎 2 圈固定	1 346	2012
	三相引出线			
	引线头			

整流器整流,然后输入逆变器,且逆变器内的支撑电容吸收了功率半导体器件开关过程产生的尖峰电压。因此,牵引发电机承受的尖峰电压对电机绝缘材料的损害较小,可认为是由逆变器的支撑电容吸收的^[1]。

目前,成都中车公司生产的牵引发电机有 10 余种系列,额定电压 U_N 最高是 1 346 V,多为不同时期设计,且汇流环绝缘结构不尽相同。汇流环结构示意图如图 1 所示。其结构是将引线头和三相引出线焊接在集流环上,然后在表面绕包不同的绝缘材料,制成牵引发电机的汇流环。对不同时期汇流环绝缘结构统计分析,选取部分统计数

据,如表 1 所示。

表 1 仅列举了 5 种方案,但已表明:(1)汇流环包扎所用绝缘材料种类多,用量少,采购和管理难度大;(2)成都中车公司 2011 年前采用云母带为多胶云母带,胶含量较高(34%以上),包扎层数多,不利于真空压力浸渍(VPI)时浸渍树脂的渗透^[4],且多胶云母带储存期较短(≤ 6 个月)。因此,在降低制造成本和提高可靠性的基础上,如何对汇流环绝缘结构进行优化、精简工艺显得尤为重要。

2 优化绝缘结构的设计方案

2.1 优化前绝缘结构

根据汇流环使用绝缘材料统计数据,有以下突出问题:(1)实际消耗量。汇流环使用 3 种绝缘材料,每种材料的用量较少,并且牵引发电机生产特点是小批量多样化,因此采购成本较高和物料浪费严重。(2)工艺。每种绝缘结构存在细微差别,包扎工艺文件种类多。(3)安全裕度。牵引发电机属于低压电机,汇流环所处位置有足够的空气间隙,再外包 5~6 层绝缘材料将导致安全裕度过大。

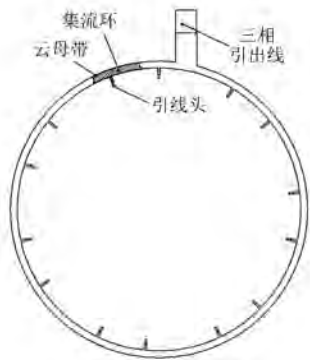


图 1 汇流环结构示意图

2.2 优化后绝缘结构

选取表 1 中方案 5 的绝缘结构作为本次优化的结构,按 1 346 V 额定电压等级和 8 倍绝缘设计安全裕度计算,将主要外包绝缘材料减至 1 种。优化后绝缘结构在种类、绕包次数、工艺时间等有不同程度的降低,其中在工艺时间和材料总量方面降低明显,分别下降了约 60% 和约 35%,如表 2 所示。

表 2 汇流环绝缘结构对比(4 个环)

对比项	种类	绕包次数	工艺时间/h	绝缘厚(单边)/mm	材料质量/kg
优化前	3	5	1.7	1.16	3.4
优化后	2	2	0.7	0.72	2.2

3 优化结构的试验验证

3.1 云母带样品检测

方案 5 中所用中胶云母带是以粉云母纸为基材,采用环氧亚胺胶粘剂,双面分别粘合无碱玻璃布和聚酯无纺布,其中,玻璃布使云母带具有一定强度,聚酯无纺布的透气性提高了在 VPI 时的浸润性,便于层与层间的粘贴。胶粘剂的质量直接决定了云母带的质量,聚酯亚胺基团的引入,提高了胶粘剂的耐热性能,并使制成的云母带更柔软,包扎时更利于服帖,提高产品应用性能^[5]。

根据 GB/T 5019.2《以云母为基的绝缘材料第 2 部分:试验方法》第 8 项的试验方法对云母带样品进行检测。样品检测结果表明:各项检测结果均符合相应指标要求。云母带的基本成分检测结果如表 3 所示。

表 3 云母带样品检测指标

序号	参数名称	指标	样品
1	厚度/mm	0.18±0.02	0.192
2	宽度/mm	19±0.5	19
3	云母纸定量/(g·m ²)	75±10	74.75
4	玻璃布定量/(g·m ²)	85±10	84.93
5	聚酯无纺布定量/(g·m ²)	20±3	20
6	挥发物含量/%	≤1.0	0.1
7	胶粘剂类型	环氧树脂	环氧亚胺
8	胶粘剂含量/%	16±4	16.55
9	抗拉强度/(N·10 mm ⁻¹)	≥60	238.2
10	电气强度/(kV·mm ⁻¹)	≥10	11.6

3.2 模拟线棒介质损耗和击穿电压试验结果

采用 8.25 mm×25.4 mm×400 mm 的扁铜线,按照优化后的汇流环绝缘结构进行包扎,即:用中胶云母带样品半叠包 2 次,用聚四氟乙烯带(脱模用,VPI 处理后剥离)平包一次,要求绕包平整服帖。将线棒放至浸漆设备,压力 $p < 400$ Pa,持续时间 $t \geq 10$ min,输入聚酯亚胺浸渍漆; $0.48 \text{ MPa} \leq \text{压力 } p \leq 0.69 \text{ MPa}$,持续时间 $t \geq 25$ min,滴漆 30 min 后放入 165~180 ℃ 的烘箱中干燥 8 h,即可得测试用模拟线棒。

击穿电压和击穿场强分别为 18.03 kV、25.04 kV/mm。表 4 所示为模拟线棒的介质损耗测试结果。

表 4 模拟线棒介质损耗测试数据 %

序号	室温介质损耗 $\tan \delta$						155 ℃ 时 $\tan \delta$
	$0.2U_N$	$0.4U_N$	$0.6U_N$	$0.8U_N$	$1.0U_N$	$\Delta \tan \delta$	$0.6U_N$
1	1.53	1.62	1.77	2.71	3.88	0.120	7.41
2	1.66	1.81	2.19	3.9	5.33	0.265	6.98
3	1.52	1.72	2.11	3.87	5.63	0.295	8.04
平均值	1.57	1.72	2.02	3.49	4.95	0.227	7.48

注:(1) $\tan \delta$ 为介质损耗正切值; $\Delta \tan \delta$ 为常态介质损耗正切值增量,其值为室温下 $0.6U_N$ 与 $0.2U_N$ 条件时介质损耗正切值之差的 1/2; U_N 为工频额定电压,取 4 000 V。(2) 例如,序号 1 在 $0.2U_N$ 室温条件下,介质损耗 $\tan \delta$ 值为 1.53%。

由于低压电机没有线圈质量分等标准,参考行业标准 JB/T 50133《中型高压电机少胶整浸线圈 产品质量分等》作为依据,对试验数据进行分析。试验表明:(1) 模拟线棒的常态介损 $\tan \delta_{0.2U}$ 低于 2%,常态介质损耗增量 $\Delta \tan \delta$ 低于 0.4%,热态介损(155±5) ℃ 低于 15%,符合 JB/T 50133 标准中一等品的要求。(2) 瞬时工频击穿电压(18.03 kV)至少高出电机额定电压 10 倍以上,瞬时工频击穿场强 25.04 kV/mm,大于 20.00 kV/mm,满足电机使用要求。

4 有限元分析

4.1 计算模型

选取表 1 方案 5 中 U 环做分析,引线头和三相引出线与集流环按一定工艺焊接形成汇流环本体,表面绕包有云母带样品。对其结构简化处理,

将主要部件提取进行工程建模分析。选择交流传导电场作为求解器,按式(1)中的添加 u_1 电压的峰值电压,作用于汇流环本体, u_2 激励源作用于云母带。至此,交流传导电场求解模型主要设置已完成^[6]。

汇流环与引线头绝缘结构的优化设计基于该电场分布的计算分析,有限元分析云图能清晰表明电场的分布情况。选取引线头和三相引出线与汇流环连接段作为分析模型,汇流环本体表面绕包有云母带样品,选取方案5作为分析对象,则该电场问题对应的数学模型为^[7]

$$\begin{cases} \nabla(\varepsilon_r \varepsilon_0) = 0 \\ u_1 = 1346 \sin(120\pi \cdot t) \\ u_2 = 0 \\ \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

场域中各点的电场强度:

$$E = -\nabla u \quad (2)$$

式中: ε_r ——材料相对介电强度;

ε_0 ——真空介电强度;

t ——时间;

E ——电场强度;

u ——电势。

4.2 结果分析

根据图1的结构进行交流电场强度有限元计算,可得如图2、图3中电场分布云图所示。

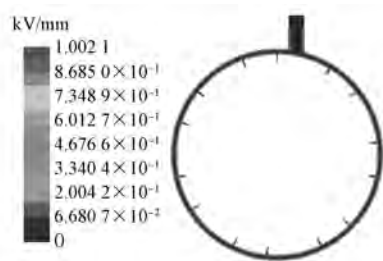


图2 方案5汇流环电场整体分布云图

从图2可以看出电场强度 E 最高点为 1.00 kV/mm ,从图3可以看出该最大值位于引线头表面,电场强度主要分布于导体表面,贴合引线头处最大电场强度为 1.00 kV/mm ,相比而言,引线头处是绝缘薄弱点。因此,工艺上需将引线头排列尽可能均匀,并留足够的空气间隙^[8],防止绝缘击穿。

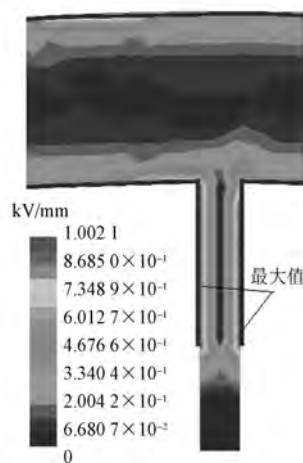


图3 方案5汇流环电场局部分布云图

同时,将优化后的汇流环绝缘结构用于额定电压 1346 V 的电机上,共试用了3台电机,至今已有一年以上,无任何质量问题发生。

5 结 语

综合以上分析,得出如下结论:

(1) 优化后的绝缘结构在材料总量上减少了约35%,耗费工艺时间降低了约60%,形成了标准的汇流环绝缘结构的绕包工艺,达到降低成本和提高劳动效率的目的。

(2) 额定电压 $U=1346 \text{ V}$ 时,汇流环电场分布云图最大值 1.00 kV/mm 位于引线头处,结合整体云图分布情况,相比而言,引线头处是绝缘薄弱点。

(3) 按优化后汇流环绝缘结构制作线棒的介质损耗、瞬时工频击穿电压和击穿场强测试,结果表明,优化后的结构满足电机使用要求。

(4) 优化后的汇流环绝缘结构用于额定电压 1346 V 的电机上,使用效果良好。

【参考文献】

- [1] 胡汉春.机车电传动机车控制[M].北京:中国铁道出版社,2012,196-200.
- [2] 申瑞源.我国机车车辆技术的发展与展望[J].铁道学报,2019,41(1):36.
- [3] 高亮,高云霞,郑才华.CDJF201L发电机的励磁机电枢汇流环设计改进和验证[J].电机技术,2014(3):12.

(下转第93页)

表 6 所示为负载试验原始检测数据。根据线性回归分析方法对检测数据相关系数进行计算, 相关系数 γ 为 0.99, 可见系统检测数据一致性非常好。

表 6 负载试验原始检测数据

序号	电压/ V	$I_{uv}/$ A	$I_{vw}/$ A	$I_{wu}/$ A	电流 变比	$P_{11}/$ W	功率 变比	$P_{12}/$ W	功率 变比	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	频率/ Hz	转矩/ ($N \cdot m$)	电阻/ Ω	温度/ $^{\circ}C$
1	380.5	3.960	3.936	3.927	20	1 503.83	20	807.38	20	1 467.18	50	274.91	0.180 090	93.6
2	380.6	3.425	3.394	3.394	20	1 302.02	20	675.85	20	1 472.45	50	235.62	0.181 569	96.3
3	380.1	2.874	2.847	2.841	20	1 091.61	20	541.02	20	1 477.52	50	194.50	0.182 446	97.9
4	379.9	2.401	2.375	2.362	20	910.42	20	403.08	20	1 482.29	50	156.06	0.183 104	99.1
5	379.9	1.934	1.899	1.897	20	726.21	20	255.86	20	1 486.96	50	115.73	0.183 268	99.4
6	380.7	1.529	1.507	1.498	20	553.49	20	110.91	20	1 491.41	50	76.59	0.183 159	99.2
7	380.7	1.289	1.273	1.269	20	431.02	20	7.88	20	1 494.55	50	48.53	0.182 939	98.8

5 结 语

本文采用四象限变频静止电源作为电梯驱动电源, 利用直接转矩控制方式作为模拟负载来进行电机测试, 具有动态响应快、加载精度高、操作简单方便等特点。适用于交流同步电梯曳引机、交流异步(变频、双速、单速)电梯曳引机、自动扶梯或自动人行道驱动主机对电网供电或三相交流变频器供电的三相异步或同步、永磁式感应、有齿和无齿的曳引式或强制式电梯驱动系统试验。现场运行试验表明: 所提测试台运行稳定可靠、测量精度高、安全性能好、节能效果明显, 属于节能型的测试系统装备。

【参 考 文 献】

[1] 封锦, 韩广盈. 低压大功率矿用变频器智能一体化

测试系统[J]. 电子世界, 2015(19): 77.
[2] 何晓航, 丁圻训. ABB 变频器在 3 000 kW 交流电机试验台上的应用[C]//2008 年全国电工测试技术学术交流会议论文集, 2008: 177.
[3] 陈叶荣, 吴汉熙, 韩宝江, 等. WT1800 功率计与 KISTLER 传感器集成在电机检测系统中的应用[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(1): 43.
[4] 林梅丽. 四象限变频器与传统变频器在电梯应用上的节能效果及输入指标对比[J]. 电气应用, 2012, 31(8): 40.
[5] 李建军, 汪蓉, 李怀珍. ACS800 变频器在自动扶梯驱动主机加载试验台上的应用[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 46.

收稿日期: 2019-04-18

(上接第 75 页)

[4] 蔡巨敏, 张秀丽, 周健. 高压电机少胶云母带配套用 VPI 浸渍树脂的研制[J]. 绝缘材料, 2004, 37(2): 7.
[5] 侯力. 新型 F 级云母带用胶粘剂的研制[J]. 绝缘材料, 2005, 38(3): 17.
[6] 阎照文. ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详

解[M]. 北京: 中国水利出版社, 2006.
[7] 何荣涛, 余良清. 252 kV 高压套管绝缘结构优化设计[J]. 电气开关, 2016, 54(4): 55.
[8] 沈诗佳, 程航. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 18-20.

收稿日期: 2019-02-26