

一种提高风力发电机定子绝缘处理过程 浸渍漆填充效果的工艺方法

袁春龙

(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 绝缘结构的完整性对于风力发电机长期可靠运行具有重要意义。基于对大型永磁直驱风力发电机绝缘结构特点的分析,提出了一种在定子嵌线过程对定子铁心槽口进行密封的工艺方法,以保证绝缘处理过程铁心槽内的浸渍漆(即浸渍树脂)的填充效果。应用该工艺方法制作的产品铁心槽内结构间隙浸渍漆填充饱满,绝缘电阻、介质损耗、击穿电压等各项电气数据均比原结构有明显提升。该工艺方法的推广应用可以有效保证大型永磁直驱风力发电机定子绝缘结构的完整性和可靠性。

关键词: 永磁直驱风力发电机; 槽口密封; 浸渍漆; 填充效果; 真空压力浸渍

中图分类号: TM 31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0088-04

An Operation Process to Improve Filling Effect of Insulating Resin in Wind-Generator Stator Insulating Treatment Course

YUAN Chunlong

(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The integrity of insulation structure was of great importance for the long-term reliable operation of wind-generator. Based on the analysis of the structural features of large-size direct-drive permanent-magnet wind-generator, a new operation process of sealing the iron core slot during stator winding inserting course was put forward to improve the filling effect of insulating resin. The iron core slot of the product made by this process was full filled by insulating resin. Test data such as insulation resistance, dielectric loss factor and breakdown voltage were improved obviously compared with those of the original structure. The results indicate that integrity and reliability of insulating structure are assured effectively with the sealing process.

Key words: direct-drive permanent-magnet wind-generator; slot sealing; impregnating resin; filling effect; vacuum pressure impregnation

0 引言

电机的绝缘是电机制造中最重要的组成部分之一。绝缘性能的优劣对电机的运行性能和使用寿命起着至关重要的作用^[1-2]。

在电机的制造过程中,为了保证电机的绝缘性能,通常采用一次或两次真空压力浸渍(VPI)工艺,对电机定子进行绝缘浸渍处理,再配合相应的烘培工艺,以达到绝缘的目的^[3-4]。绝缘处理后铁心槽内的浸渍漆(又称浸渍树脂)的填充效

果,直接影响产品的最终绝缘性能^[5-7]。

绕组装配完成的电机定子铁心槽部,槽绝缘与绕组之间、绕组与绕组的层间等位置必然存在间隙。绝缘处理过程,槽绝缘与层间绝缘本身对浸渍漆的吸附能力差,槽内这些位置的浸渍漆不能很好地留存,浸渍漆流失以后局部将形成孔洞,对电机绝缘性能造成不良影响。

为此,本文以一种大型永磁直驱风力发电机为示例,介绍了一种绝缘处理过程有效提高铁心槽部浸渍漆填充效果的工艺方法。

作者简介: 袁春龙(1972—),男,高级工程师,研究方向为风力发电机制造工艺。

1 定子槽部结构特点及绝缘处理填充效果

大型永磁直驱风力发电机采用内定子结构,成型的定子绕组嵌放在圆柱体结构的铁心的外圆表面的铁心槽内。典型的定子槽部结构如图 1 所示,绕组与铁心之间垫放槽绝缘,上层绕组与下层绕组之间垫放层间绝缘。其中,槽绝缘一般为复合材料的纸,是定子绕组的主要对地绝缘;层间绝缘一般为层压板材料,衬垫在电机定子铁心中上层绕组与下层绕组之间。由于上、下层绕组分属不同的相,存在电位差,因此也需要绝缘。

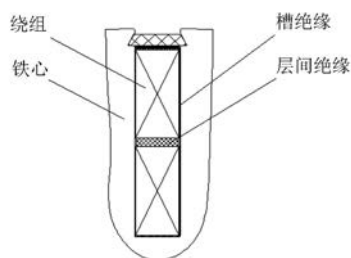


图 1 定子槽部结构示意图

大型永磁直驱风力发电机定子的绝缘处理烘焙工艺主要有 2 种:立式静止烘焙(即定子铁心槽方向与地面垂直)和卧式旋转烘焙(即定子铁心槽方向与地面平行)。由于大型永磁直驱风力发电机定子中的槽绝缘与绕组之间、绕组与绕组的层间等位置的间隙较大,而槽绝缘和层间绝缘本身对漆的吸附能力差,槽内这些位置的浸渍漆无法很好地留存,成为了槽内浸渍漆的主要流失通道。无论采用哪种烘焙方式,在烘焙过程中均存在大量浸渍漆流失。

现有技术中,通过提高槽满率可以达到减少铁心槽内浸渍漆流失的目的,但效果有限。过高的槽满率会增大嵌线难度,增加绝缘损伤的风险,并导致主绝缘过度压缩,影响其吸漆能力;同时,过高的槽满率也会影响槽内浸渍漆的渗透效果,无法完全阻止槽内浸渍漆的流出。

此外,现有技术中还有将定子一端槽口完全密封,配合立式静止烘焙的方法,以期达到提高槽内浸渍漆填充效果的目的。但是立式静止烘焙中,浸渍漆在重力作用下向下端流动,导致下端绕组的漆膜过厚、上端绕组挂漆量不足等缺陷;同时

立式静止烘焙过程中绕组表面会产生大量因绝缘漆滴流形成的漆瘤,影响定子的外观及后续装配,对电机的运行产生安全隐患。对漆瘤进行清理和打磨则容易造成绝缘破损,影响产品质量。

可见,槽内浸渍漆的流失会造成槽内绝缘之间存在空隙,直接影响电机定子绕组的整体性和电气性能,埋下了潮气渗入的隐患。如何有效防止烘焙过程中浸渍漆流失,是目前电机绝缘领域技术人员亟待解决的技术问题之一^[8]。

2 槽口密封

为了有效防止绝缘处理过程中浸渍漆的流失,保证电机定子槽部浸渍漆填充效果,本文以大型永磁直驱风力发电机为示例,介绍了一种绝缘处理过程有效提高铁心槽部浸渍漆填充效果的工艺方法:槽口密封。

槽口密封的要点在于定子嵌线过程,使用合适的材料对定子铁心槽部两端进行处理,使整个槽部形成一个相对密封的结构,绝缘处理烘焙过程中能有效地防止槽内的漆液流失;在浸渍漆充分固化后,定子槽内形成完整密闭,从而更好地密封电机定子槽部及使内部绝缘,达到防潮、防环境腐蚀的作用,整体提高电机的绝缘性能。

通过图 1 可以看出,槽绝缘全角度包裹绕组,铁心部位整个槽部形成了一个相对密封的结构。但在出槽口位置,绕组与槽绝缘之间、上下层绕组之间存在一定的结构间隙,成为烘焙固化过程浸渍漆流失的通道。嵌线之前,在预成型的槽绝缘及层间绝缘两端粘贴单面带黏胶的适型毡,如图 2 所示。为了满足嵌线要求,考虑对层间绝缘进行适当加工,减小尺寸。以上处理,可以有效地浸渍出槽口位置绕组与槽绝缘之间、上下层绕组之间的结构间隙,使整个槽部形成一个相对密封的结构。



图 2 槽绝缘及层间绝缘两端粘贴适型毡示意图

为了满足电机安全稳定运行的要求,应保证足够的爬电距离。大型永磁直驱风力发电机定子

嵌线使用的槽绝缘两端对称放置,端部伸出槽口均 20 mm。上述方案中使用的适型毡厚度为 1 mm,单面设置黏胶,加工成 15 mm 宽度的条状。嵌线前适型毡预先黏贴在槽绝缘内侧及层间绝缘两端,与端部平齐。

适型毡为单面上胶材料,其毛毡和胶层可以根据电机的绝缘等级进行调整。毛毡吸漆效果好,适型能力强,单面上胶后,固定方式简单、牢固,在经过浸漆处理后,毛毡与浸渍漆形成了牢固的整体。

3 槽口密封技术应用验证

风力发电作为可再生绿色能源日益受到重视,国家也正在对风电技术实施政策性引导,使风电市场需求得到了迅猛拓展。永磁直驱风力发电机由于体积及质量大,单台价值高,安装及拆卸、运输均极为困难,运行环境恶劣,维护和检修困难,所以该电机的长期稳定可靠运行显得极为重要。对于大型永磁直驱风力发电机来说,定子绝缘处理过程浸渍漆的填充效果对保证电机长期稳定运行具有重要意义。

为了验证槽口密封技术在产品上的实际应用效果,制作定子局部模型进行对比试验。定子局部模型为完整定子铁心产品的 1/24,嵌装有 6 根有效绕组,完全按照实际产品的技术要求进行制作。按照正常的嵌线、浸漆、烘焙等工艺过程完成局部模型制作后,进行常规性能检测、耐环境(冷热冲击)试验,之后测量绝缘电阻、介质损耗、击穿电压等电气数据,并对定子进行剖切,检查绕组浸渍漆填充效果。

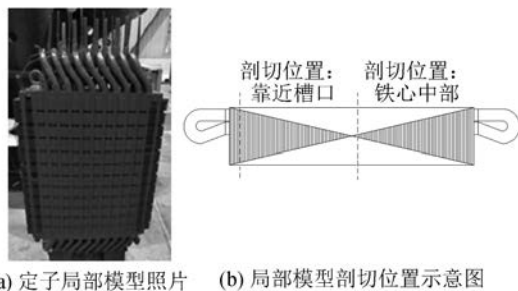


图 3 定子局部模型照片及剖切位置示意

绝缘电阻、介质损耗、击穿电压等是评价绝缘结构整体性能的重要指标。通过对其测量可以判断结构的绝缘强度、空洞率、含湿量、老化程度等。

定子局部模型耐环境试验后最终测试绝缘电阻、介质损耗、击穿电压数据(环境温度 21.5 ℃;环境湿度 75%)如表 1 所示。数据显示,经过槽口密封工艺处理的产品绝缘电阻、介质损耗、击穿电压等各项电气数据均有一定程度的提升。绝缘电阻提升较小,但介质损耗平均值由 0.97% 降至 0.91%,击穿电压平均值由 25.2 kV 提高至 27.6 kV,改善明显。

表 1 定子局部模型最终检测电气数据对比

名称	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	平均值
绝缘电阻/ 原结构	385	281	376	358	320	347	344.5
GΩ(R60 s)密封结构	391	380	368	373	374	349	372.5
介质损耗/ 原结构	1.06	0.98	0.94	0.92	0.98	0.93	0.97
% (2.25 kV)密封结构	0.9	0.88	0.9	0.9	0.98	0.92	0.91
击穿电压/ 原结构	25.48	24.39	25.17	27.86	23.24	24.98	25.2
kV 密封结构	26.53	25.42	29.91	29.17	28.95	25.57	27.6

定子局部模型剖切效果对比如图 4 所示。

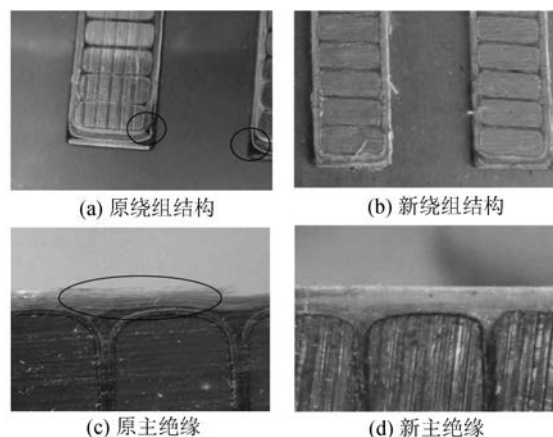


图 4 定子局部模型剖切效果对比

定子局部模型剖切后观察绕组切割断面处。新结构处理的绕组匝间绝缘无孔隙、分层;主绝缘无空隙,分层,整体性好;各绝缘带浸润性好,不易剥离;楔下、层间、槽底边角浸渍漆填充良好。由此可见,新结构对比原结构改善明显。

通过以上定子局部模型验证可知,槽口密封技术能有效改善永磁直驱风力发电机定子绝缘处理过程浸渍漆填充效果。目前,槽口密封技术已全面应用于各型永磁直驱风力发电机制造过程,为提高发电机整体绝缘质量和保证电机长期安全稳定运行提供了可靠保障。

4 槽口密封的 2 种改进方案

为了保证电机定子嵌线顺利完成,介绍的槽口密封方案将槽绝缘上的适型毡设置在定子铁心槽口外侧。槽绝缘伸出铁心部分,由于没有铁心的限制,所以将出现一定程度张开的情况,影响密封的效果。

解决以上问题,可将密封用适型毡设置到槽内。为此,提出槽口密封的 2 种改进方案,作为进一步提高槽口密封效果的改进方向。

(1) 槽口位置冲片槽适当加宽。根据适型毡的厚度,槽口位置冲片槽加宽 0.5~1.0 mm,适

型毡可以设置到槽内。嵌线作业前,为了方便嵌线操作,可根据需要将单面带黏胶的毛毡定位粘贴在绕组直线部位两侧。

(2) 使用减薄适型毡。槽口位置冲片槽加宽,需要另外投放冲片模具,导致产品成本增加。如果在嵌线间隙允许的情况下,选择厚度较薄的适型毡,可以实现将适型毡设置到槽内的要求。经验证,永磁直驱风力发电机的嵌线间隙选择厚度规格为 0.2~0.5 mm 的适型毡,可以满足嵌线要求。嵌线前,同样将单面带黏胶的毛毡定位粘贴在绕组直线部位两侧。

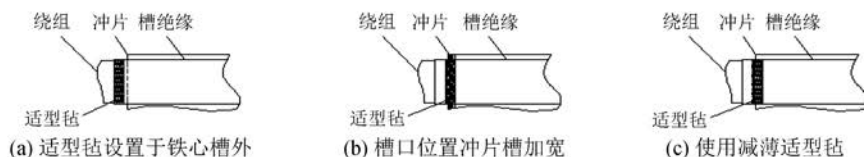


图 5 槽口密封不同实施方案示意图

5 结 语

电机绝缘性能的优劣对电机的运行性能和使用寿命起着至关重要的作用。绝缘处理后铁心槽内的浸渍漆填充效果,直接影响产品的最终绝缘性能。本文以大型永磁直驱风力发电机为示例,提出了一种绝缘处理过程有效提高铁心槽部浸渍漆填充效果的工艺方法:槽口密封。定子局部模型试验结果表明:该工艺方法可以有效提高绝缘处理效果,保证大型直驱风力发电机定子绝缘结构的完整。所提槽口密封的工艺方法对各类型电机定子绝缘处理均具有一定的参考价值和实际意义。目前,槽口密封技术已全面应用于各型永磁直驱风力发电机制造过程。

【参考文献】

[1] 罗小丽.电机制造工艺及装配[M].北京:机械工业出版社,2015.

[2] 吴佳梁,李成峰.海上风力发电机组设计[M].北京:化学工业出版社,2012: 68.

[3] 文敏,陈红生,薛长志,等.3.3 kV 海上风力发电机绝缘系统耐环境适应性试验研究[J].绝缘材料,2017,50(7): 36.

[4] 张卓凡,薛长志,袁春龙,等.TJ1169 环氧改性不饱和聚酯浸渍树脂在风力发电机上的应用研究[J].绝缘材料,2017,50(6): 7.

[5] 占学斌,陈红生.地铁车辆牵引电机绝缘结构防水性能的设计改进[J].城市轨道交通研究,2009,12(11): 90.

[6] 陈洪武,陈红生,张亦黄,等.海洋大气中的风力发电机绝缘系统耐候性试验研究[J].绝缘材料,2012,45(2): 23.

[7] 李强军,姜其斌,陈红生,等.1.5 MW 直驱式风力发电机绝缘系统的研究[J].绝缘材料,2009,42(3): 10.

[8] 李福胜,俎以宏.电机绝缘处理的防流失技术探讨[J].中国水运(学术版),2006,6(10): 35.

收稿日期: 2019-08-01