

国产空冷汽轮机定子整体 VPI 工艺应用研究

魏雄强 李泽端

东方电气集团东风电机有限公司, 四川 乐山 614000

摘要: 通过全部采用国产绝缘材料和浸渍漆对汽轮机单只定子线棒进行少胶 VPI 工艺试验研究, 确定了汽轮机定子整体 VPI 绝缘结构、防晕结构及定子整体浸渍烘焙工艺参数。通过在 10.5 kV 级 7.5 MW 汽轮机上应用, 真机线棒及定子整机各项电气性能均满足标准要求。经过电站运行实践, 证明东风电机开发的定子少胶 VPI 绝缘系统取得成功, 且能满足 3 800 m 高海拔地区运行要求。

关键词: 国产; 定子线棒; 汽轮机; GVPI; 工艺应用

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2017)02-0030-04

Application Research of Domestic Insulation Materials in the GVPI Technology for Air-cooled Turbogenerator

WEI Xiongqiang, LI Zeduan

(DEC Dongfeng Electric Machinery Co., Ltd., 614000, Leshan, Sichuan, China)

Abstract: This paper introduces the research of insulation technology of the stator bars with domestically manufactured materials after vacuum pressure impregnation (VPI) on 10.5 kV air-cooled turbogenerators. Properties of dielectric loss, breakdown voltage, and critical coronal voltage attain the national standards. Finally establishes insulation structures, coronal structure and technologic parameters of GVPI. By the running on 10.5 kV, 7.5 MW air-cooled turbogenerators for years, test that our corporation's development of VPI insulation system is reliable and successful. And attain technologic demands at high-altitudes above 3 800 m.

Key words: domestic insulation materials; stator bar; air-cooled turbogenerator; GVPI; application research

随着东风电机公司的不断发展和市场的需求, 近年来公司汽轮机产品日益增多, 生产压力较大。特别是在汽轮机定子线棒制造过程中, 由于工艺控制难度很高, 造成定子线棒质量分散性很大。单只定子线棒耐压试验及嵌线后整机耐压试验时的击穿返工率较高, 且电站运行时质量事故常有发生, 造成返修成本较高, 并对东风电机汽轮机市场竞争力造成一定影响。

定子线棒采用 VPI 绝缘系统制造具有绝缘厚度薄、绝缘性能分散性小等特点, 有利于定子线棒性能的提高。但汽轮机定子线棒端部较长, 端部型线结构复杂, 若采用单只定子线棒 VPI 制作, 为

了保证端部型线, 需要设计和制造较复杂的热压模具, 导致模具费用很高, 且生产效率与多胶模压系统相比难以有很大提高。定子整体真空压力浸漆 (GVPI) 相对于单只线棒真空压力浸漆 (SVPI), 具有模具费用低、制造工序少、生产效率高、制造成本低的特点; 并有利于消除线棒与定子铁芯槽壁之间的间隙, 可以提高机组导热性能; 同时机组运行时具有机械性能、热稳定性能优良, 耐环境因素性能优越, 运行安全可靠等优势。因此定子整体 VPI 相比于单只线棒 VPI 更适合于中小型汽轮机制造。

为提高汽轮机整体质量水平, 同时加快生产

收稿日期: 2017-01-17

作者简介: 魏雄强(1988-), 男, 2010年毕业于武汉工程大学材料化学专业, 理学学士学位, 工程师。现在东方电气集团东风电机有限公司从事电机绝缘材料、绝缘技术、绝缘工艺和绝缘试验的研究及应用工作。

进度,降本增效,增强汽轮机市场竞争力,汽轮机定子整体 VPI 绝缘技术的开发成为东风电机当务之急。

1 汽轮机单只定子线棒 VPI 制作工艺研究

为了减少研发费用和缩短研发周期,东风电机决定全部采用国产化绝缘材料,在该公司高压电机单只定子线棒 VPI 绝缘系统研究的基础上,结合汽轮机定子线棒实际生产经验,展开了对汽轮机定子线棒 VPI 绝缘系统的研发。其中,浸渍漆采用国产 H 级低粘度耐高温改性聚酯亚胺树脂,乙烯基甲苯作为活性稀释剂。经过与浸渍漆相容性试验后,选用国产 5442-1 玻璃布补强少胶云母带作为主绝缘材料。采用全自动包带机进行少胶云母带包扎,经过多次试验,包扎张力调整为 45N,少胶云母带包扎不掉粉不分层。

1.1 单只定子线棒 VPI 绝缘结构研究

东风电机汽轮机产品型号众多,导致定子线棒种类也较多。为了使开发出的绝缘系统能适用于更多型号机组上,选择 4 只具有两匝且导杆带换位结构的 10.5 kV 级汽轮机定子线棒导线进行工艺试验,重新设计股间绝缘结构、匝间绝缘结构、少胶主绝缘结构、防晕结构,再进行真空压力浸漆烘焙固化。既可以验证定子线棒导杆股间绝缘结构,也可以验证线棒的匝间绝缘结构以及主绝缘和防晕结构。

2 汽轮机定子整机 VPI 试制

经过对汽轮机单只定子线棒 VPI 制作进行工艺试验,定子试验样棒的型腔尺寸和电气性能均能

1.1.1 导杆绝缘结构和匝间绝缘结构

股线经换位编花后,采用多胶粉云母板作为排间绝缘,复合材料作为换位绝缘,复合粉云母板作为换位填充绝缘,分别进行导杆股间胶化。每匝导杆胶化完成后,进行棱角打磨,再每匝半叠包多胶云母带 2 层,两匝合起来再半叠包多胶云母带 1 层。

1.1.2 主绝缘及防晕结构

工艺试验线棒主绝缘及防晕结构见表 1。

表 1 工艺试验线棒主绝缘及防晕结构

要求	材料名称	半叠包绝缘层数	单面厚度/mm
直线主绝缘	少胶云母带	8	2.24
端部主绝缘	少胶云母带	8	2.24
防晕层和保护层	低阻带	1	0.16
	高阻带	2	0.72
	聚酯收缩带	1	0.4

1.2 工艺试验结果及分析

试验线棒经过真空浸漆烘焙后,对线棒进行检查,线棒表面外观良好,对线棒的型腔尺寸用卡规进行检查,直线段型腔尺寸满足要求,直线模压段未发现发空现象。

4 只试验定子线棒的常态介损、常态介损增量、表面电阻率、股间短路试验、匝间耐压、起晕电压、击穿试验均达到标准要求,说明该绝缘结构能满足汽轮机定子线棒 VPI 制作要求。具体电气性能试验结果见表 2。

表 2 第二次汽轮机定子线棒 VPI 电气性能试验结果

项目	常态介损 $\text{tg}\delta\%$ $0.2 U_N$	常态介损增量 $\Delta\text{tg}\delta\%$ $(0.6 U_N - 0.2 U_N)$	工频击穿电压/kV	表面电阻率/ Ω	匝间耐压
1	1.22	0.09	78	6 400	合格
2	1.01	0.24	73	4 800	
3	0.92	0.67	73	7 300	
4	1.13	0.22	81	6 200	
标准	≤ 3	≤ 2	≥ 70	1 000 ~ 100 000	

满足标准和装配工艺要求,故定子线棒绝缘结构设计和真空浸漆烘焙工艺能满足汽轮机定子整体 VPI 工艺要求。为节约制造成本和缩短试制周期,决定借用现有的 10.5 kV 级 7.5 MW 常规多胶模压

机组的定子铁芯，重新设计定子线棒电磁方案和绝缘结构方案后，进行真机模拟定子线棒的工艺试验。根据真机模拟样棒的绝缘结构和绝缘制作工艺，再进行首台 10.5 kV 级 7.5 MW 定子整体 VPI 机组试制。

2.1 真机模拟定子线棒试验

2.1.1 匝间绝缘结构和主绝缘结构

匝间绝缘半叠包多胶云母带 2 层，合匝后半叠包多胶云母带 1 层；主绝缘直线半叠包少胶云母带 7 层，厚度为 1.96 mm，端部半叠包少胶云母带 6 层。

表 3 真机模拟线棒电气试验数据

项目	常态介损 $\text{tg}\delta\%0.2U_N$	常态介损增量 $\Delta\text{tg}\delta\%$ ($0.6U_N - 0.2U_N$)	热态介损 155°C $\text{tg}\delta\%0.6 U_N$	起晕电压/kV	击穿电压/kV	表面电阻率/kΩ
1	0.67	0.99	6.25	24.5	71	11.6
2	1.01	0.24	4.81	23.5	73	12
3	0.92	0.67	5.66	25.5	75	13.5
4	1.13	0.22	5.21	26	70	9.8
标准	≤ 3	≤ 2	≥ 9	≥ 15.75	≥ 70	1 ~ 100

2.2 定子整体 VPI 试制及整机电气性能试验

为了保证首台机组试制成功且能满足高海拔地区运行要求，在分析和总结汽轮机单只定子线棒 VPI 工艺试验的基础上，采用一系列新材料和新工艺，对定子线棒少胶制作、嵌线以及定子整机真空浸漆烘焙工艺、电气性能试验等均做了特殊要求。如：采用三合一云母带包扎匝间绝缘，加强了定子线棒匝间绝缘性能；减薄了主绝缘厚度，提高槽满率；定子机座内外表面进行特殊防护处理；嵌线单只线棒试验要求；对定子整体浸漆工艺进行优化，要求采用呼吸式加压，保证线棒绝缘能完全浸透等。

定子整体真空浸漆烘焙完成后，按照相关标准要求，对定子整机进行电气性能试验。试验结果及分析如下。

2.2.1 三相绕组的绝缘电阻和吸收比试验

采用 5 000 V 兆欧表，对定子整机三相绕组的绝缘电阻进行测试，绝缘电阻和吸收比均满足标准要求。具体测试数据见表 4。

2.2.2 三相绕组直流耐压和直流泄露电流测试

在冷态下，采用直流高压设备，分别对定子整机三相绕组从 $0.5 U_N$ 开始到 $2.5 U_N$ ，按每级

2.1.2 防晕结构

槽部采用全固化低阻防晕带半叠包 1 层；端部用全固化高阻防晕带半叠包 2 层；端部表面再半叠包 1 层聚脂纤维带。

2.1.3 真机模拟线棒试验结果

真机模拟线棒表面外观良好，直线段绝缘未发现发空现象，直线段型腔尺寸满足标准要求。真机模拟线棒匝间耐压、常态介损、常态介损增量、热态介损、起晕电压、击穿电压、表面电阻率均达到质量分等标准要求，故可以进行定子整机试制。具体试验数据见表 3。

$0.5 U_N$ 分阶段升高，每阶段停留 1 min，读取泄露电流值。三相绕组均通过了直流耐压试验，且在各阶段的直流泄露电流值非常小，满足相关标准要求，具体测试数据见表 5。

表 4 三相绕组的绝缘电阻和吸收比

相序	绝缘电阻/MΩ		吸收比 $R_{60'}/R_{15'}$
	15/s	60/s	
U 对 V、W 相	11 600	34 000	2.93
V 对 U、W 相	12 200	3 7000	3.03
W 对 V、U 相	9 800	28 600	2.91
判定技术要求	$\geq 720 \text{ M}\Omega$		≥ 1.6

表 5 三相绕组直流耐压和直流泄露电流

工艺要求	直流泄露电流/ μA				
	$0.5U_N$	$1.0 U_N$	$1.5 U_N$	$2.0 U_N$	$2.5 U_N$
U 对 V、W 相	0	1	2	2	3
V 对 U、W 相	0	0	1	2	3
W 对 V、U 相	0	1	1	2	3
判定技术要求	泄露电流大于 $20\mu\text{A}$ 者，各相的差别不大于最小值的 50%；泄露电流小于 $20\mu\text{A}$ 者，不考核各相间的差别				

2.2.3 三相绕组起晕电压试验

经过对定子线棒端部毛刺和漆瘤的清理后，

分别对定子三相绕组进行起晕电压试验，三相绕组起晕电压均大于 10 kV。

2.2.4 三相绕组交流耐压试验

分别对定子三相绕组进行 25 kV 交流耐压试验，耐压 1 min 未破压，满足标准要求。

3 电站运行情况

首台试制 7.5 MW 定子整体 VPI 机组应用于云南某高海拔电站(电站海拔高度 1 870 m)，东风电机供货的 7.5 MW 常规多胶模压机组在该电站运行时定子线棒温度最高达到约 130℃。更换了该定子整体 VPI 机组后，在满负荷运行工况下，实际定子运行温度较原机型定子温度下降 20℃左右，且其他各项指标均在标准要求范围内。目前该机组已投入商业运行近 3 年，未出现任何异常，赢得了业主的好评。

4 结语

汽轮机定子整体 VPI 绝缘技术具有绝缘一体性好、绝缘厚度薄、线棒间绝缘性能分散性小，定子散热性能好，电气、机械、热稳定性优良，耐环境因素性能优越等特点；同时可以缩小定子体积、简化生产工艺流程、大大降低制造成本；故汽轮机定子采用整体 VPI 技术制造已成为中小型汽轮机行业发展的趋势。

东方电机技术人员通过一系列工艺试验研究，在绝缘材料选择、绝缘结构设计及绝缘工艺研究等方面积累了许多宝贵的经验，形成了一套较为完整的汽轮机定子整体 VPI 绝缘体系，且开发的绝缘系统能满足高海拔地区运行要求。首台定子整

机 VPI 机组的成功制造和运行，填补了东风电机不能进行汽轮机 VPI 制作的空白，并为其它汽轮机定子整体 VPI 机型的开发奠定了坚实的基础，增强了公司汽轮机产品的市场竞争力。通过与单只线棒多胶模压系统制作对比分析，汽轮机采用定子整体少胶 VPI 绝缘系统制作具有显著的经济效益和社会效益。

东风电机后续又进行了一系列定子线棒主绝缘减薄试验，10.5 kV 级机组，定子线棒单边主绝缘厚度减薄为 1.68 mm，并成功进行了整机制造。定子整机试验各项指标均达到标准要求，且定子整机起晕电压大于 12 kV，能满足 3 800 m 以内高海拔地区运行要求。该机组目前也已成功投入商业运行，应用效果良好。

参考文献：

- [1] 李泽端, 魏雄强. 旁多电站高海拔 VPI 绝缘结构研发与应用[J]. 机械, 2014, 41: 112 - 114
- [2] 漆临生, 皮如贵, 梁智明. 发电机单只线棒 VPI 绝缘系统研究[J]. 东方电气评论, 2009, 23(4): 33 - 38
- [3] 祁世发, 朱珊珊, 张东林. 哈电大中小型交流电机 LD - F 绝缘体系[J]. 大电机技术, 2010(8): 49 - 55
- [4] 陈宗旻. 真空压力浸渍树脂现状及发展[J]. 绝缘材料, 2003, 36(3): 37 - 39
- [5] Tomas Weege, Basic Impregnation Techniques [C]. Electrical Electronics Insulation Conference, 1977, and Electrical Manufacturing & Conference Proceedings, 22 - 25 Sep 1977, Page (s): 709 - 715
- [6] 刘晨阳, 尹默. F 级高压电机环保型 VPI 整浸绝缘结构研究[J]. 绝缘材料, 2012, 45(3): 26 - 28
- [7] 吴小蕾. 660MW 20kV 汽轮发电机定子线圈 VPI 应用研究[J]. 绝缘材料, 2009, 42(1): 25 - 28

(上接第 29 页)

电流为 400 mA 工况下，湿除出口折算粉尘排放浓度($\alpha = 1.4$)平均值为 4.6 mg/Nm³；满足出口粉尘浓度 ≤ 5 mg/m³ 的设计要求。湿除效率为 89.2%，满足设计 ≥ 83.4 的要求。

4 结语

通过实际工程项目验证证明，饱和湿烟气工

况下，PPs 塑料材质收尘极能形成均匀水膜，并能够很好导电。实际工程运行表面，东方锅炉 WESP 除尘效果明显，除尘后能够达到粉尘 ≤ 5 mg/m³ 的超低排放指标。采用 PPs 非金属材质收尘极的立管式湿式静电除尘器，能够很好地应用在燃煤电厂深度除尘领域。