

大型直驱永磁风力发电机定子VPI渗透性工艺优化及可靠性分析

段灿明

江苏中车电机有限公司 江苏 盐城 224000

摘要：真空压力浸漆（简称VPI）的渗透性决定产品浸渍漆填充的饱满，产品质量的可靠及稳定。本文介绍了直驱永磁风力发电机产品分别采用不同的VPI的保真空/保压时间工艺参数，并与原工艺进行对比。通过最终样件的绝缘性能、击穿电压、剖面填充效果，确认最优的VPI渗透工艺参数，以提高产品生产效率和保证产品质量。

关键词：VPI；渗透性；绝缘性能；剖面填充效果

引言

真空压力浸漆又称VPI浸漆，在大型电机中已成为一种成熟的绕组绝缘处理工艺^[1-2]。第1次VPI中真空度和压力参数的设置目的是充分去除绝缘结构中的低分子物，同时确保浸渍漆的浸透性，第2次VPI的目的是弥补第一次VPI后的外部缺陷。目前直驱永磁风力发电机定子单边主绝缘部多余4层，现有的产品的保真空和保压时间存在一定的冗余。为缩短直驱永磁风力发

电机VPI的保真空时间/保压时间，确定最经济的工艺参数。

本文介绍使用铁心长度为1600mm的产品为模型，使用线棒、局部模型开展浸渍漆渗透性^[3]试验验证，在AB四种不同的保真空时间和保压时间下浸漆，其中A方案为现有工艺参数，B为优化的工艺参数，确认分别采用这四种不同保真空/保压时间下的浸漆效果，为后续工艺优化提供技术论证。

表1 保真空/保压时间方案

工序	方案A	方案B
1次VPI	保真空2h，保压3h	保真空1h，保压2h
2次VPI	保真空0.5h，保压1h	保真空0h，保压0.5h
其他参数	参照现有产品	参照现有产品

1 试验过程及分析

1.1 线棒验证和验证过程

制作四根线棒，分别按照方案AB两种方案浸漆烘焙，线棒浸漆完成后进行如下检测：

1) 线棒的对地绝缘电阻、2.25kV下的常态、热态介

损（155℃），记录电容值。检测后送至试验室进行击穿试验。

2) 样件完成电气检测后需进行切割，具体切割位置如图1所示。

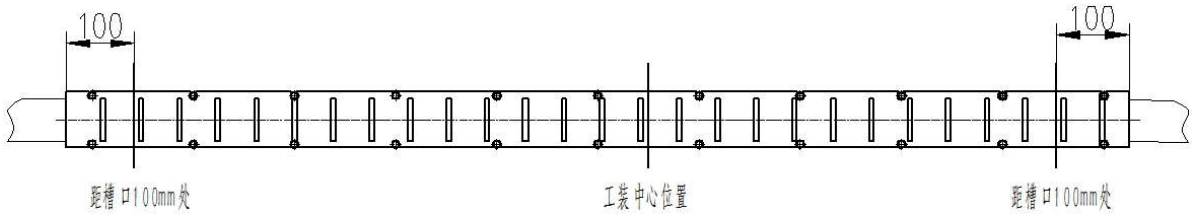


图1

1.2 验证结果及分析

1.3 常规参数

编号	冷态电阻15S (GΩ)	冷态电阻60S (GΩ)	温度	湿度	1.5kv介损 (%)	2.25kv介损 (%)	2.25kv介损 (155℃)	电容 (uF)	击穿电压 (kV)
A	13.6	126	28℃	84%	0.83	1.33	8.03	0.46	29.65
B	140	349			0.87	1.01	8.3	0.44	31.86

1.4 剖面效果

引线侧距槽口100mm切面	非引线侧距槽口100mm切面	匝间绝缘与对地绝缘解剖图
		

1.5 结果分析

1) 常规性能结果分析

采用方案AB两种方案绝缘电阻、冷态介质损耗、热态介质损耗、电容值及击穿电压数据相当。

2) 绝缘浸透性分析

采用方案AB两种方案浸漆的线棒，线圈断面处，匝间绝缘无孔隙、分层。电磁线绝缘基本透明，可清晰观察内部导体。线圈断面处主绝缘无孔隙、分层、整体性好。聚酯热收缩带浸润性好，不易剥离，内层云母带基本透明。断面靠槽底处边角树脂填充良好，无明显孔隙。槽绝缘表面有可视挂漆，且槽绝缘不易分层，与主绝缘贴合良好。

3) 局部模型验证

2 验证过程

线棒验证已初步证明保真空/保压时间按照方案AB具有一定的可行性，为进一步确认最优的保真空/保压时间，保证产品质量的可靠性和稳定性，通过局部模型开

展验证，局部模型为1/24产品，局部模型绝缘结构与产品相同，见图2。按照方案B进行浸漆烘焙处理，产品完成浸漆烘焙后进行绝缘性能检测。

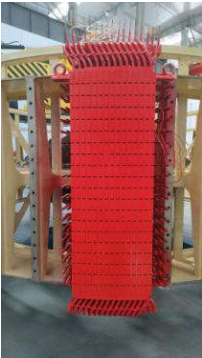


图2

为了观察局部模型线圈内部的绝缘浸渍漆填充性，对模卡进行剖切，切割后观察浸渍漆填充效果。

2.1 验证结果及分析

2.2 常规参数及局部模型剖面图

温湿度				13℃/47%				最大值	最小值	平均值	评定标准要求	评定结果
线圈编号		1	2	3	4	5	6					
绝缘电阻 (GΩ)	R _{60s}	93.9	74.1	74.8	67.3	71.4	69.6	93.9	67.3	76.5375	≥ 30 GΩ	合格
介质损耗 (%)	2.25kV	0.99	0.98	0.97	0.96	0.99	0.95	0.99	0.95	0.97	≤ 3.5%	合格
2.25kV对地电容 (pF)		7814	7771	7823	7803	7886	7817	7886	7771	7821.375	-	-
击穿电压 (kV)		36.3	32.28	27.2	28.52	28.75	33.27	36.3	27.2	31.2275	≥ 18kV	合格
模卡剖切检查结果												
												1.线圈横断面处，匝间绝缘无孔隙、无分层；电磁线绝缘基本透明，可清晰观察内部导体。 2.主绝缘无孔隙、无分层，整体性好，聚酯热缩带浸润性好。

2.3 结果分析

1) 局部模型按照方案B的保压和保真空时间后的浸漆烘焙效果良好,线圈各项电气绝缘性能均满足要求,各项指标均验证合格。缩短保压和保真空时间可以满足浸漆要求和产品质量要求,可进行风力发电机定子实物生产与制造。

工艺参数	编号	绝缘电阻 N1 (60S) (MΩ)	绝缘电阻 N2 (60S) (MΩ)	环境温度 (°C)	环境湿度 (%)	2.25KV介质 损耗值-N1 (%)	2.25KV介 质损耗值- N2 (%)	电容值-N1 (PF)	电容值-N2 (PF)
优化后,一次浸漆:保真空1h,保压2h,二次浸漆:保真空0h,保压0.5h	1	1410	1390	17	74	1.02	0.99	1.53	1.53
	2	1370	1440	19	78	1.04	1.07	1.58	1.58
	3	1550	1540	18	81	1.18	1.11	1.52	1.52
	4	1360	1360	17	85	1.16	1.1	1.56	1.57
	5	1570	1580	17	76	1.17	1.16	1.54	1.54
优化前,一次浸漆:保真空2h,保压3h,二次浸漆:保真空0.5h,保压1h	1	1040	1020	19	55	1.2	1.14	1.64	1.65
	2	1400	1410	18	62	0.7	0.69	1.56	1.56
	3	1060	1070	17	59	1.07	0.98	1.61	1.61
	4	1420	1470	20	61	0.82	0.81	1.58	1.58
	5	1440	1420	17	64	0.93	0.91	1.57	1.58

3 结束语

线棒在方案A、方案B工艺下进行浸漆,切割后线圈浸透性良好、线圈断面处匝间和主绝缘无孔隙、无分层、整体性好,工装断面靠槽底处边角树脂填充良好,无明显孔隙。方案A的工艺优化为方案B的工艺具备技术可行性,基于最经济的工艺参数的前提下按方案B工艺开展局部模型验证及产品实物验证,验证数据满足产品要求,说明缩短保真空/保压时间可保证产品质量,同时可有效提高生产效率,降低生产成本,加快产品浸漆的

2.4 产品实物验证

1) 根据前期线棒和局部模型验证结果分析缩短保压/保真空时间可满足产品质量要求,可进行实物验证,按照方案B开展试生产,最终产品数据如下表,根据表中数据分析优化前后数据相当,产品均满足质量要求。

效率和生产流转速度。

参考文献

[1]俞小平,采用真空压力浸漆技术的电机绝缘的应用研究[J].中小型电机,2003,30(2):52-54.

[2]袁春龙,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[J].电机与控制应用,2019,46(2): 88-91.

[3]任科,邓灿华,王晓群,等.高压电机定子VPI渗透性分析[J].工业技术创新,第03卷第01期2016年2月50-52.