

## 换流阀冷却系统外冷风机频繁故障问题分析及解决措施

罗海平, 齐开强, 湛 杨, 孙利强, 赵智杰, 白玉峰, 王正虎, 杨小莹, 柳丰奥, 徐晨杨

国网新疆电力有限公司超高压分公司 新疆乌鲁木齐

**【摘要】目的** 确保换流站内阀冷却系统的安全稳定运行, 以维持直流系统的整体运行状况。针对换流站阀外冷系统风机频繁故障的问题, 本研究旨在找出故障原因并提供解决措施。**方法** 通过对故障风机进行多次数据测试及拆解分析, 本研究系统地研究了风机的故障模式及原因数据测试。包括运行参数监测、振动分析等, 拆解分析则关注于风机内部结构、材料老化等方面。**对象:** 换流站阀外冷。系统风机这些风机作为阀冷却系统的关键组件, 其性能直接影响到整个换流站的运行效率与安全性。**结果** 加强定期维护、优化风机设计以及更换耐用材料在内的解决措施。预计能显著降低风机故障率, 提升换流站阀冷却系统的运行效率和安全性。**结论** 本研究成功识别了故障风机的主要故障原因, 并据此提出了有效的解决措施。这些措施对其他换流站的风机维护与管理具有积极的借鉴意义, 有助于提高整个电力系统的运行稳定性和可靠性。

**【关键词】** 换流站; 阀外冷系统; 风机故障

**【收稿日期】** 2024 年 11 月 23 日

**【出刊日期】** 2024 年 12 月 27 日

**【DOI】** 10.12208/j.jeea.20240018

### Analysis and solutions to the frequent faults of the external cooling fans in the converter valve cooling system

Haiping Luo, Kaiqiang Qi, Yang Zhan, Liqiang Sun, Zijie Zhao, Yufeng Bai, Zhenghu Wang, Xiaoying Yang, Fengao Liu, Chenyang Xu

State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., UHV Branch, Urumqi, Xinjiang

**【Abstract】Objective** To ensure the safe and stable operation of the valve cooling system in the converter station, so as to maintain the overall operating condition of the DC system. The purpose of this study is to find out the cause of the frequent failure of the fan in the external cooling system of the valve of the converter station and to provide solutions. **Methods** Through data testing and disassembly analysis of the faulty fan, the failure mode and cause data testing of the fan were systematically studied in this study. Including operating parameter monitoring, vibration analysis, etc. Disassembly analysis focuses on the internal structure of the fan, material aging and other aspects. **Object:** Converter station valve external cold. As a key component of the valve cooling system, the performance of these fans directly affects the operating efficiency and safety of the entire converter station. **Results** The solution measures including regular maintenance, optimization of fan design and replacement of durable materials were strengthened. It is expected to significantly reduce the fan failure rate and improve the operating efficiency and safety of the valve cooling system in the converter station. **Conclusion** This study successfully identified the main fault causes of the faulty fan, and put forward effective solutions accordingly. These measures have positive reference significance for the fan maintenance and management of other converter stations, and help to improve the operation stability and reliability of the whole power system.

**【Keywords】** Converter station; Valve external cooling system; Fan fault

#### 引言

直流输电工程的核心单元为换流阀, 换流阀在运行过程中会产生较大热量, 易影响换流阀设备的

稳定运行, 因此需配备额外的冷却系统以辅助降温。

常见的换流阀闭式循环冷却系统包含主循环泵和室外换热设备, 其中主循环泵作为换流阀一次冷却水

作者简介: 罗海平 (1991-) 男, 汉, 甘肃和政, 本科/中级, 研究方向为特高压直流输电技术。

循环的动力源，而室外换热设备是保证换流阀冷却要求的核心。室外换热设备主要分为空气冷却器和闭式冷却塔两种，不管是空气冷却器或是闭式冷却塔，冷却风机都是其核心设备。因此，风机的稳定可靠运行将直接关系到整个直流输电系统的正常运行。近年来许多西北地区建设投运较早的换流站阀外冷风机已达其运行寿命，出现阀外冷风机频繁故障的现象，尤其在迎峰度夏大负荷期间，风机故障率攀升，严重影响设备安全稳定运行。因此对阀外冷风机频繁故障问题进行深入研究及剖析，并对该问题提出相应的解决措施，为相关换流站同类型风机的运行问题提供参考<sup>[1-3]</sup>。

### 1 故障风机详情

一台阀外冷成品风机主要由定子、转子、叶片、轴承部件组成，本次拆解的故障风机生产厂家均为 ZIEHL-ABEGG 施乐百，其定子、轴承为国产，转子、叶片为德国进口。风机型号为 FC091-SDS.7Q.V7，由上海施乐百公司于 2021 年第 14 周生产组装，运行寿命可达 30000-40000 小时。

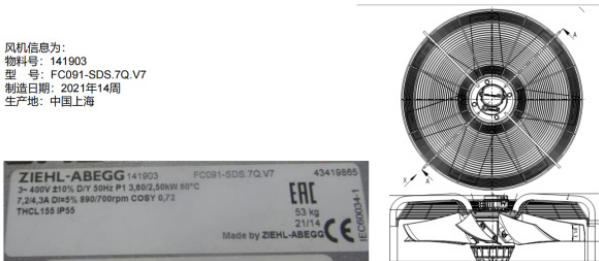


图 1 风机型号参数及模型图

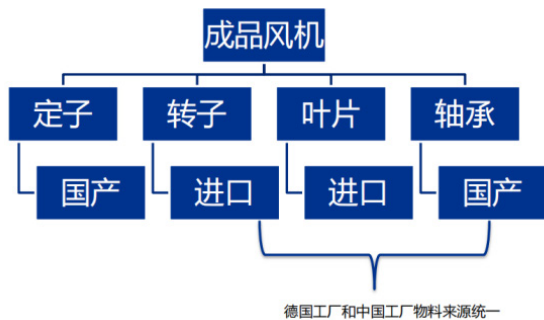


图 2 风机主要组成部件

### 2 风机故障分析

#### 2.1 故障风机解体情况

本次对 16 台故障风机进行返厂接体检测，解体后对相间绝缘、相间阻值、热保护等电机回路进行了测试，结果显示均正常。根据厂家的检测来看，风

机外观良好，手转叶轮有阻力感并伴有异响，绕组阻值基本正常，但绝缘测试异常。拆解发现定转子出现接触摩擦，绕组表面出现明显高温烧蚀痕迹，轴承油脂变色。判断风机运转过程中动平衡失效导致转子与定子之间产生摩擦，进而导致风机电机出现过温现象导致绕组绝缘性能降低，最终导致风机故障跳闸。

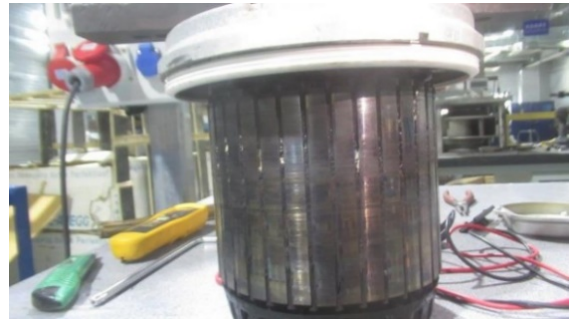


图 3 轴承转子外侧有明显磨损

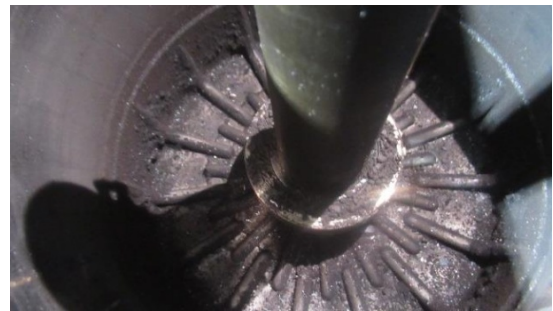


图 4 内部存在明显烧焦痕迹



图 5 绕组及绝缘隔纸有明显磨损痕迹并发黄

通过对 16 台风机定子绕组阻值进行测量，从故障机绕组检测结果看，定子绕组自身的阻值保持正常范围内，个别定子阻值偏高可能是绕组绝缘破坏后产生的影响。

510 SRP1	Resistance 1	3,95	Ohm
515 SRP2	Resistance 2	3,8	Ohm
530 SRP3	Resistance 3	3,6	Ohm
535 SRTol	Resistance tolerance	25	%

图 6 绕组阻值标准

序列号	外观	绕组 Ω			
		U	V	W	TB
43419867054	OK	4.3	4.1	7.6	0.3
43419867001	OK	4.3	3.9	3.6	0.1
43426140029	OK	4.06	3.78	3.59	0.2
43426146052	OK	4.4	4	3.8	0.2
43426146017	OK	4.16	3.86	3.7	0.03
43426143004	OK	4	3.71	3.53	0.03
43426143012	OK	4.04	7.73	3.58	0.02
43419867032	OK	4.07	3.58	3.56	0.03
43419867036	OK	3.97	7.46	3.48	0.02
43430049001	OK	4.06	3.79	3.53	0.02
43419867039	OK	4.03	3.8	3.55	0.02
43426140034	OK	4.3	4	3.9	0.3
43419867038	OK	4.4	4.2	3.9	0.2
43426146008	OK	4.4	4.6	4	0.3
43426146042	OK	4.4	4.2	3.9	0
43426143038	OK	4.03	3.75	3.56	0.01

图 7 故障机绕组阻值检测

从故障机上拆下的轴承看，轴承基本结构保持完好，未有明显破坏而出现尺寸偏差的迹象。轴承外圈出现过热变色，内圈滚道表面一面中心有一定的磨损痕迹，另一面无磨损，沟道表面无电腐蚀痕迹。外圈整个滚道表面有一定磨损和变色痕迹。钢球表面有一定磨损痕迹和变色，可能是轴承外圈与轴承座之间发生蠕动磨损导致其之间的间隙增大，两者之间出现空气层造成外圈热量传导阻断，外圈过热后热量堆积造成油脂出现变质，最后轴承运转可能会出现噪音和失效<sup>[4-8]</sup>。

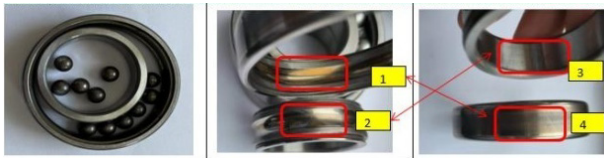


图 8 故障机轴承拆解检查

拆解故障机转子进行三维扫描，通过三维扫描并与标准模型比对，显示转子实物上各个点位的尺寸偏差。扫描结果颜色深的位置尺寸偏差大，颜色浅的位置尺寸偏差小。通过三维扫描显示上端一侧红色区域最大偏差 0.107mm，旋转 180° 后右图上端未发现红色区域，说明转子上端一周圆度存在一定的偏差。但是转子内壁存在定转子摩擦，该偏差一定程度上可能也跟该摩擦有关。通过三坐标检测发现有摩擦的样品中出现最大达到 0.179mm 的圆度偏差，其它样品的偏差均在合理范围内。不管圆度偏差大小，转子内壁均有摩擦现象，说明转子内壁圆度的偏差可能不是造成定转子摩擦的根本原因所在。

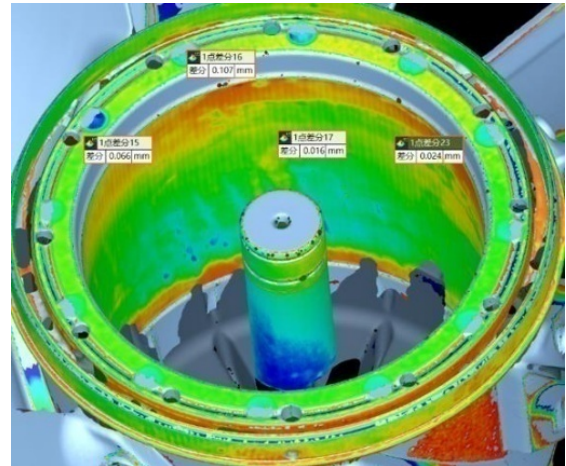


图 9 三维扫描

ID	Feature type	ISO 286	UTol	LTol	Actual value	Eff. length	%Dev	Graphics
1_1-20.5_BK	Diameter ø	169.0000			165.9687	-0.0313		
1_2-20.5_BK	Roundness	0.0000			0.0218	0.0218		
1_3-20.5_NBK	Diameter ø	169.0000			165.9763	-0.0237		
1_4-20.5_NBK	Roundness	0.0000			0.0378	0.0378		
2_1-68.5_BK	Diameter ø	169.0000			165.8505	-0.1495		
2_2-68.5_BK	Roundness	0.0000			0.0182	0.0182		
2_3-68.5_NBK	Diameter ø	169.0000			165.8492	-0.1508		
2_4-68.5_NBK	Roundness	0.0000			0.0336	0.0336		
3_1-80.5_BK	Diameter ø	169.0000			165.7997	-0.2003		
3_2-80.5_BK	Roundness	0.0000			0.0138	0.0138		
3_3-80.5_NBK	Diameter ø	169.0000			165.8004	-0.1996		
3_4-80.5_NBK	Roundness	0.0000			0.0253	0.0253		

图 10 三坐标检测

抽测故障机返回后转子+叶轮组装件的动平衡，其结果如表格所示。只有一台风机动平衡量跟标准要求接近，其它抽测的结果均显示动平衡超差较大。成品风机出厂前动平衡测试记录显示都为合格。

动平衡			
A面 (2.99)		B面 (3.15)	
角度	不平衡量	角度	不平衡量
111	22.78	328	14.88
308	14.2	196	5.22
60	14.3	212	20.7
235	22.1	81	14.3
287	23.4	118	13.3
262	22.3	118	13.06
266	18.2	125	13.2
<b>231</b>	<b>2.93</b>	<b>148</b>	<b>3.46</b>

图 11 转子动平衡检测

## 2.2 风压对风机的影响

通过现场风机的运行状态看，以电机为中心的大部分区域没有或者仅有少量的气流通过，只是沿着风筒内壁的一圈区域有较大的气流通过。根据风机的空气性能曲线，当前在用风机出风量小静压

变高，将会出现电机超功率运行。功耗升高，供电电压稳定其线电流必然升高，同时电机绕组温升升高，轴承处在温升较高的电机内部氛围中其油脂将加速老化失效，随后轴承运转不畅磨损加大，轴承外圈与轴承室之间磨损加剧而出现跑外圈，轴承室尺寸磨损变大后转子运转摆动变大，最终出现定转子摩擦扫膛。该机械摩擦将加剧电机内部温升并烧毁绝缘隔纸，导致绝缘失效跳闸停机（这个情况是一个相对较为长期的过程）。

现场的条件实测数据：

当日现场的大气压力为  $P1=93.62\text{kPa}$

风机出风温度约  $T1=50^\circ\text{C}$

实测风机线电流为  $I1=6.8\text{A}$

该型号风机规格书上标注的测试条件：

额定电流是  $I1=7.2\text{A}$

空气密度  $\rho=1.16\text{kg/m}^3$

标准物理大气压力  $P0=101.3\text{kPa}$

根据空气密度计算公式，

空气密度= $1.293 \times (\text{实际压力}/\text{标准物理大气压}) \times (273.15/\text{实际绝对温度})$ ，绝对温度=摄氏温度+273.15

所以现场气压为  $93.62\text{kPa}$  时，空气密度  $\rho=1.293 \times (93.62/101.3) \times (273.15/(273.15+50)) = 1.01\text{kg/m}^3$

（注：空气的成分并不是固定不变的，随着高度的改变、气压的改变，空气的组成比例也会发生改变。空气密度是指在一定的温度和压力下，单位体积空气所具有的质量，这就是空气密度。在标准条件下（ $0^\circ\text{C}$ ，1个标准大气压（1atm）），空气密度约为  $1.29\text{kg/m}^3$ 。在  $0^\circ\text{C}$  及一个标准大气压（ $1.013 \times 10^5\text{Pa}$ ）空气密度为  $1.29\text{kg/m}^3$ 。人们把气体在  $0^\circ\text{C}$  和一个标准大气压下的状态称为标准状态，空气在标准状态下可视为理想气体。）

因为空气密度和电机的额定电流成正比例关系，所以该状态下项目现场在用风机的实际额定电流，实际额定为：

$$\rho1/\rho0=I \text{ 实际额定}/I0$$

$$I \text{ 实际额定}=7.2 \times 1.01/1.16=6.27\text{A}$$

根据现场实际空气密度计算，风机额定电流长期应不大于  $6.27\text{A}$  为合格工况，即当前风机运行中，其实际线电流为  $6.8\text{A}$  属于已超负载运行（超载

$8.5\%$ ）。如果跳闸的保护电流设置为  $8.6\text{A}$ （机房空开设置的电流跳闸值），对于风机来说达到  $8.6\text{A}$  线电流将是严重超载，大于实际额定电流值  $37\%$ 。

将现场实际工况下的运行电流，根据空气密度的比例关系转化为空气密度为  $1.16\text{kg/m}^3$  工况条件：

$$\rho1/\rho0=I \text{ 实际额定}/I \text{ 转化}$$

$$I \text{ 转化}=6.8 \times 1.16/1.01=7.81\text{A}$$

此时风机的功耗为：

$$P=3UI\cos\phi$$

$$P=1.732 \times 400 \times 7.81 \times 0.72=3895\text{W}$$

由图示可知，功耗在  $3895\text{W}$  时对应风量在  $8000\text{m}^3/\text{h}$  左右。

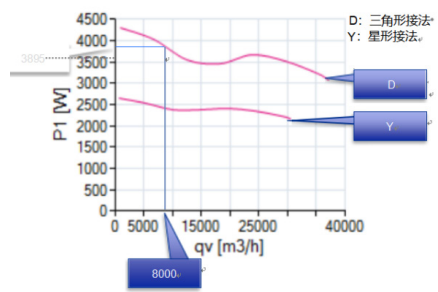


图 12 风量与功耗关系

在当前功耗  $3895\text{w}$  情况下，风机的出风量为  $8000\text{m}^3/\text{h}$  左右，根据空气性能曲线中风量和风压的对应关系得知（如下页图示）：

➤  $Psf0$ ：空气密度为  $1.16\text{kg/m}^3$  时的静压，直接读取风压数值即  $300\text{pa}$

➤  $Psf1$ ：空气密度为  $1.01\text{kg/m}^3$  时的静压，因为静压值和空气密度成正比例关系，

$$\rho1/\rho0=Psf1/Psf0$$

$$psf1=1.01 \times 300/1.16=261\text{pa}$$

因为该型号风机在空气密度为  $1.16\text{kg/m}^3$  时测试的最高静压  $psfmax0$  为  $241\text{pa}$ ，并根据静压值和空气密度成正比例关系得知，在现场使用该风机时，其最大的工作静压值  $psfmax1$  为：

$$psfmax1=psfmax0 \times 1.01/1.16=209.8\text{pa}$$

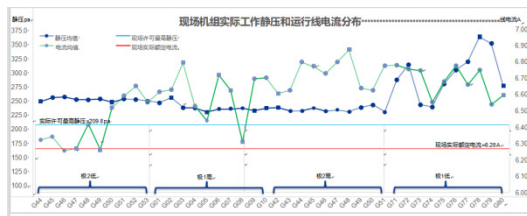


图 13 现场机组实际工作静压和运行线电流分布

因此,如果项目现场风机实际工作中的静压超过 209.8pa,其将处于高静压工作区。

### 3 运检策略

换流站阀外冷系统如遇类似风机故障问题,可参考如下运检方式:

一是站内通过修改冷却塔启动温度定值,使得迎风度夏期间进阀温度能持续维持在正常水平,减少通过给空冷器下方空气喷水降温的频次及时间。

二是通过批量更换风机,更换轴承更为耐磨的进口轴承的高静压风机,风机运行工况与风机振动解耦,降低风机烧毁可能,确保阀冷设备的可靠运行。

三是与厂家开展空冷器结构对风机静压的影响专题研究,期望通过降低风机静压使风机运行在稳定区,延长风机使用寿命。

四是加大对现场风机下方散热翅片高压水冲洗频次,确保风道畅通。

五是后续重点开展轴承耐风沙、承载力等方面与使用寿命关系的研究,查找规律,制度针对性措施。

### 4 总结

现场通过风机解体测试研究、风机静压研究及测量清洗空散、更换风机轴承前后的风量、风速、振动、电流等参数,对比分析认为造成风机频发故障原因:

一是因为风机下方阀冷散热翅片存在间隙堵塞,阻挡风路。风机下方为散热器,散热片密度非常高,相邻两片间隙目测约 1mm 左右,从底部无法看到另一端,本次通过由上至下冲洗的方式清洗内部沙土。清洗前系统静压远远超过风机额定静压;清洗后静压下降明显说明箱体堵塞严重。箱体堵塞导致风机实际工作电流长期超该工况下额定电流运行,造成电机绕组温升升高,轴承处在温升较高的电机内部

氛围中其油脂加速老化失效,随后轴承运转磨损增大,最后绝缘失效跳闸。

二是风机质量存在差异。不同品牌的轴承尺寸均在要求的公差范围内(轴承外径公差要求为-0.012~0),在尺寸都符合公差要求情况下,轴承加工精度更高,在异常的高静压/高振动运行环境下,能维持的相对更久。

### 参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 连铸二冷风机振动系统稳定分析及应用. 潘伟;梁兵兵;龙兵;覃锋;韦瑞脑;卢柏亮;梁尚峰;俞浩然.广西节能,2024(04).
- [3] 增压风机变频器故障分析及系统改进对策探讨. 沈杰.冶金动力,2023(05).
- [4] 连铸二冷风机振动系统稳定分析及应用. 潘伟;梁兵兵;龙兵;覃锋;韦瑞脑;卢柏亮;梁尚峰;俞浩然.广西节能,2024(04).
- [5] 连铸机设备液压系统常见问题与成因分析. 周游.中国金属通报,2022(09).
- [6] 毛志平,武剑利,蒋久松,等.特高压直流阀水冷系统隐患深度排查及防范措施研究[J].湖南电力,2017,37(4):21-23.
- [7] 刘孝,钱逸磊,闫全全.一起换流站阀水冷系统故障问题分析及处理[J].电力与能源,2023,44(3):296-300.
- [8] 韶钢二冷风机风管改造的探索与实践. 王琳琳;刘用权;江昆雄.南方金属,2023(01).

**版权声明:** ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**