

# 一起水电站定子绕组隐患处理的全过程分析

孙俊龙 陶旭 范彬

(湖北正源电力集团有限公司 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 本文针对一起水电站定子绕组泄漏电流不正常的隐患处理案例,分析缺陷产生的原因,介绍具体试验和处理的全过程,创新提出故障检测方法,对定子绕组泄漏电流不正常的现象提出新的思路,以供相关单位参考。

**关键词:** 定子绕组; 泄漏电流; 隐患处理

## 0 引言

水轮发电机定子是水轮发电机组的静止部件,由机座、铁芯、绕组、铜环及基础螺杆等组成。机座是固定铁芯的结构件,铁芯和绕组是定子为了产生旋转磁场和保证磁通及电流通路必备的电磁部分,绕组由许多线棒按一定规律排列而成,线棒通常分两层嵌入铁芯的槽内,以一定的接线方式连接成回路,通过铜环引线汇流后输出电功率。为了使定子绕组能承受正常条件下电磁力和振动力的作用,短路条件下不致产生有害的位移和变形,造成绝缘损伤或匝间短路等故障,绕组在槽部和端部都固定牢,通常槽部采用槽楔压紧。

发电机直流耐压及泄漏电流试验是检测发电机绝缘性能的一项重要手段,通过测量泄漏电流可有效地发现发电机主绝缘受潮和局部缺陷,特别是能检出绕组端部绝缘缺陷。如绕组泄漏电流超标不及时有效处理,将对发电机安全稳定运行造成极大危害,甚至会导致定子绕组绝缘被击穿,造成绕组烧毁等严重事故。

## 1 隐患处理经过

### 1.1 隐患简述

正源电力集团有限公司下属峡口水电站1#发电机(SF15-16/3900)由东风发电机设备厂家生产,该发电机运行15年以来,现场相关工作人员检查及试验数据发现发电机存在线棒松动、绕组绝缘磨损、线棒绝缘降低、泄漏电流偏大等问题。在2014年以前工作人员就发现发电机线棒绝缘及泄漏电流出现异常。在2021年1月和7月对峡1号机组进行例行试验的过程中,再次发现定子A相绕组在两次进行泄漏电流和直流耐压试验中,均出现电压加至18kV左右时,泄漏电流由200 $\mu$ A开始迅速上升的情况,且试验数据振动幅度较大,无法保持稳定。经与定子生产厂家和电科院等有关技术支撑单位交流后,确定定子绕组存在部分绕组损坏的隐患,并

将此隐患定义为重大隐患。

### 1.2 检修方案制订

为全面处理1号机组定子A相绕组泄漏电流数据超标的重大隐患,峡口水电站于2021年11月10日启动峡1号机组B级检修工作。

拆机前对定子三相绕组进行了绝缘电阻、直流电阻、泄漏电流及直流耐压等试验,试验数据均合格,未发现异常。转子吊出后,随即对定子绕组进行了交流耐压试验,试验数据统一合格,对外观进行反复检查后发现存在部分放电点和破损点。

依据以上前期结果,初步制订检修处理方案,拟开展发电机整体线圈拆除清理修复(含可修复线圈进行修复、高阻处理、低阻处理、喷绝缘漆、电气试验、匝间试验等)、定子铁芯检查(含通风槽、定子铁芯通风沟内及铁芯背部机座环板上杂质异物排查,铁芯的铁损试验和喷低阻漆)和发电机整体槽楔加工,主要检修内容如下。

(1) 拆除定子绕组前,对线棒外部进行如下检查记录:

- ① 检查定子绕组弯曲部分与支持环间有无电晕放电痕迹、磨损现象等;
- ② 检查上、下槽口处定子绕组绝缘有无被硅钢片割破、磨损现象;
- ③ 检查定子绕组有无电腐蚀,通风沟处定子绕组绝缘有无电晕痕迹;
- ④ 检查槽楔松动情况、绑扎固定情况;
- ⑤ 线棒拆除。

(2) 首先对发电机线棒和铁芯表面进行清理,对外观进行初步详细检查,并记录标记相关问题缺陷。在检查各序过程中若有异常出现时,根据实际情况讨论处理方案,并根据方案进行处理。

(3) 拆除整台发电机绝缘,熔化断开定子绕组所有连接头,拆除全部线棒,避免损伤线棒绝缘及铁芯绝缘。

线棒拆除后,清理发电机铁芯槽内外,由专业人员对发电机进行检查,记录标记存在的相关问题缺陷。在检查各序过程中若有异常出现时,根据具体情况调整方案并进行处理。

(4)对拆除的线棒进行检查标记编号,对变形线棒、有裂纹线棒、磨损线棒进行绝缘修复、校形、高低阻处理,对所有拆除的修复线棒及好线棒进行烘干后,按电站要求的电气试验标准值进行试验,合格后备用。不合格或击穿的线棒修复或报废更换,全部线棒合格后方可进行下线回装。

### 1.3 试验及处理过程

检修期间正处于中部地区秋季时节,天气较为干燥,每日环境湿度一般都维持在50%以下。由于定子泄漏电流试验数据受环境湿度影响较大,在湿度达63%及以上时才出现明显异常,因此在普通检修环境下无法有效暴露故障点及故障原因。

#### 1.3.1 水轮机厂家建议处理方案

因定子绕组由许多线棒按一定规律排列而成,现有技术只能判定定子绕组某处线棒损坏,无法精准定位具体线棒损坏的位置;线棒均由绝缘外皮包裹且紧密排列,外观上难以辨别因短路高温造成的烧焦发黑现象,因此厂家建议对定子绕组进行整体拆卸,然后分段进行交流耐压试验,直至精准定位具体线棒损坏的位置,以进行更换。

此方案虽然可以有效解决定子绕组隐患的根本问题,但整体拆卸定子绕组需要大量的人工和工期,所需检修费用视检修进展情况而定,可能达到十余万元,且机组长期检修停工带来的发电损失也不可小视。据估算,此方案的直接经济损失约为30万元。

#### 1.3.2 电站所用创新处理方案

电站技术人员经过进一步深入讨论研究,认真分析造成试验数据差异的根本原因,通过在不同湿度环境下反复试验,最终证实:当外部环境湿度达63%及以上时,A相泄漏电流值迅速上升,查清了试验数据出现异常的原因(表1)。

为精确模拟湿度63%的外部环境,电站用不透气的塑料雨布搭建了简易试验室,同时用加湿器、空气净化器和抽风机等器材,使简易试验室的湿度、温度满足试验所需条件。

在测试环境湿度对试验数据的影响时,检修人员发现132槽内一根A相线棒端部出现局部放电现象。确定具体故障线棒后,检修人员对1号机组其他197槽内定子线棒进行了“地毯式”排查,另发现141槽线棒端部1处疑似放电痕迹及152、153槽内线棒上部与定子齿压板接触等异常情况(图1、图2)。其中,将132槽故障线棒拆除,清除外部绝缘层后发现线棒内部已炭化发黑(图3),若继续运行将极有可能发生定子匝间短路事故。

随后,检修人员对1号机组定子绕组132槽、141

表1 检修前不同条件下的试验数据

试验1: 定子绕组绝缘电阻(GΩ)及吸收比(2021年11月11日,温度18℃,湿度28%)				
测量阶段	测量部位	$R_{15}$	$R_{60}$	$R_{60}/R_{15}$
耐压前	A-B、C及地	4.0	10.04	2.51
	B-A、C及地	4.23	10.4	2.46
	C-A、B及地	4.11	11.0	2.68
耐压后	A-B、C及地	4.10	7.68	1.87
	B-A、C及地	4.05	10.2	2.52
	C-A、B及地	4.56	13.6	2.98
试验2: 定子绕组泄漏电流(μA)和直流耐压(2021年11月11日,温度18℃,湿度28%)				
测量部位	$0.5U_N$	$1.0U_N$	$1.5U_N$	$2.0U_N$
A-B、C及地	1	2	4	12
B-A、C及地	0	1	2	4
C-A、B及地	1	2	3	5
试验3: 定子绕组泄漏电流(μA)和直流耐压(2021年11月20日,温度17℃,湿度65%)				
测量部位	$0.5U_N$	$1.0U_N$	$1.5U_N$	$2.0U_N$
A-B、C及地	3	10	22	207
B-A、C及地	3	10	22	56
C-A、B及地	3	9	21	54

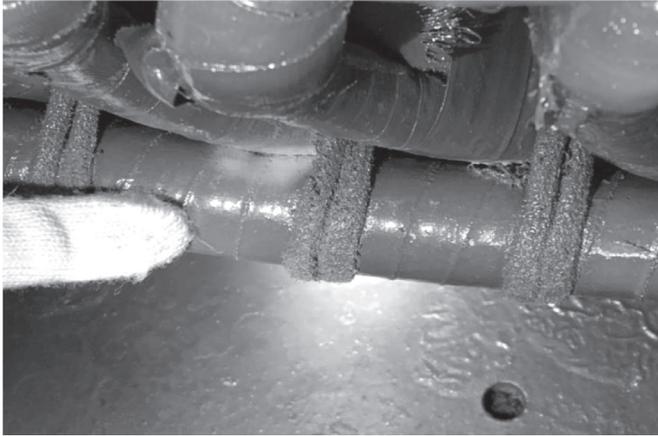


图1 疑似放电痕迹



图2 线棒端部与齿压板接触



图3 故障线棒内部绝缘炭化发黑

槽线棒进行了更换，对152、153槽内线棒进行了上抬修复处理。具体工艺方案如下：

(1) 对引线、极间连接线进行编号、记录，以便回装时对号回装；铲掉、剥开端部手包绝缘，用湿石棉保护线棒端部主绝缘，用氧气乙炔加热，拆掉全部并头套，退出全部槽楔。

(2) 拆除线棒（全部），清洗线棒表面油污，目测检查标记缺陷线棒，若绝缘有轻微损伤的，进行修补，修复后及不需要修复的线棒，表面做防晕层及高低阻修补处理，并对所有线棒进行烘干。

(3) 修复后对所有线棒进行目测检查、电气试验（参考DL/T 596-2021《电力设备预防性试验规程》中的表4，做适当调整后执行），拆除的线棒在外面不必做定子绕组泄漏电流和直流耐压试验，不合格者视情况处理或者做报废处理，合格后备用。

(4) 清理铁芯并检查铁芯槽内有无异常，铁芯紧度是否正常，视情况对铁芯进行修复处理，可以参考DL/T 596-2021《电力设备预防性试验规程》做铁损试验（1.4T、45min 或 1T、90min，磁密在1T下齿的最高温升不大于25K，齿的最大温差不大于15K，单位损耗不大于1.3倍参考值，在1.4T下自行规定），试验合格后在铁芯槽内喷半导体漆。

(5) 清理校正线棒两端股线与并头套焊接处，以不影响下序装入为好。

(6) 检查两端外绑环与铁芯的同轴度及轴向尺寸，视情况调整处理，保证同轴度、轴向尺寸及线棒距离满足要求。

(7) 在外绑环的内圆侧垫一层3mm厚的涤纶毡，防止线棒端部因电磁拉力导致线棒下沉，涤纶毡应具有较高的柔韧度，以防止线棒相间绝缘磨损。

(8) 调节线棒轴向位置，保留定位工具与铁芯下方端面的距离。

(9) 下线棒前检查嵌入的槽底测温元件是否全部更换，更换的配套的发电机定子测温电阻，应满足现场实际使用需求。

(10) 嵌入槽底垫条，埋放好槽底测温元件，有测温元件的槽底垫条为2mm，其余为4mm。

(11) 在定位工具处任选一个槽，嵌入线棒的下端面，以刚好碰到定位工具为准，将线棒推向槽底并固定，检查线棒端部的底面与外绑环的接触情况。要求4个外绑环内侧的涤纶毡压缩量由3mm压缩到1~2mm，绝对不允许有间隙。如果两端的压缩量不一致，可升高或降低定位工具的高度来调整。

(12) 嵌入全部线棒，带极间引线的线棒必须对号入座，放回原来所在槽号固定；上下线棒之间的间隙目视要均匀；鼻端节距目视较均匀平整。

(13) 更换槽底和层间所有测温元件（元器件运行年久，已老化），需在电气试验时接地。

(14) 下完线棒鼻端与并头套焊接部位，做好防护，以免胶液污染，影响后续焊接，下完线棒合口之前做电气试验。

(15) 端部绑扎（从铁芯端面数起），第一道绑绳（靠

近铁芯那道绑绳)按 $1 \times 16$ 方法绑扎;第二道绑绳间隔150mm,按 $1 \times 16$ 方法绑扎;绑扎完成后表面刷胶1遍,加热到 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 固化。

#### 1.4 试验检测结果

检修完毕后,对发电机定子三相绕组进行绝缘电阻、定子绕组泄漏电流及直流耐压试验,数据均合格(表2)。

表2 检修后的试验检测结果

试验1: 定子绕组绝缘电阻( $G\Omega$ )及吸收比(2021年12月10日,温度 $13^\circ\text{C}$ ,湿度65%)				
测量阶段	测量部位	$R_{15}$	$R_{60}$	$R_{60}/R_{15}$
耐压前	A-B、C及地	2.15	3.72	1.73
	B-A、C及地	2.17	4.04	1.86
	C-A、B及地	3.01	7.01	2.33
耐压后	A-B、C及地	0.96	1.15	1.20
	B-A、C及地	1.0	1.48	1.48
	C-A、B及地	4.52	10.5	2.32
试验2: 定子绕组泄漏电流( $\mu\text{A}$ )和直流耐压(2021年12月10日,温度 $13^\circ\text{C}$ ,湿度65%)				
测量部位	$0.5U_N$	$1.0U_N$	$1.5U_N$	$2.0U_N$
A-B、C及地	2	5	15	38
B-A、C及地	3	9	19	38
C-A、B及地	1	3	9	20

## 2 隐患处理及定子结构优化结果

本次隐患的发现和解决,不仅用相对较短的工期和较低的检修费用消除了一起定子带伤运行可能造成定子损毁的六级设备事件,同时对定子结构进行了如下优化。

(1) 线棒端部改造。采用国内新型整体绑扎结构,端箍改造放大,增加空间间隔,让下层线棒与端箍有 $3 \sim 5\text{mm}$ 的距离(中间加毛毡,避免磨损)。

(2) 绑扎方式优化。下层端部由2道绑扎变为4道绑扎,上层线棒由1道绑扎变为2道,提高了线棒端部

的抗电磁拉力、刚度、强度,避免了飞车、电网冲击等机械故障,避免造成线棒绝缘冲断、线棒下沉、绝缘磨损等问题。

(3) 焊接工艺改进。线棒并头套采用银焊工艺,采用氧气乙炔火焰加热焊接,提高焊接熔点质量,防止焊接熔点不够造成假焊,接触电阻不过关。

## 3 结语

在本次隐患处理过程中,峡口电站全体检修人员以高度的责任感和使命感全力备战为期30天的1号机组B级检修大会战,选派技术过硬的技术骨干分布在1号发电机机坑、水车室、蜗壳进入孔等多个检修点上,全力确保了1号机组定子A相绕组泄漏电流数据超标重大隐患处理得当及1号机组B级检修工作任务的顺利完成,为以后处理该类缺陷积累了宝贵的经验,保证了发电机设备的安全可靠运行和正常发电的经济效益,也守住了地方电网安全生命线和民生用电底线,为切实做好今冬明春的电力安全生产工作打下了坚实的备基础。参与本次检修的3名主要负责人员也被正源电力集团有限公司给予突出贡献奖励。

### 参考文献:

- [1] 熊荣,徐青彪,袁林.一起水轮发电机定子局放超标缺陷的分析与处理[J].水电与新能源,2022,36(04):67-70.
- [2] 张奇亮.浅谈华能龙开口水电厂发电机定子泄漏电流不平衡原因分析及处理[C]//2021年电力行业技术监督优秀论文集.2021:1246-1250.
- [3] 刘浩.发电机定子绕组绝缘电阻测量的影响因素[J].电力安全技术,2021,23(09):62-64.
- [4] 张勤霞,谷立新,李向峰.3号发电机定子故障分析[C]//全国火电300MWe级机组能效对标及竞赛第三十九届年会论文集.2010:533-537.
- [5] 姜金德,邓嵘.合山2号发电机定子缺陷的查找及分析处理[C]//广西电机工程学会第九届青年学术论坛论文集.2006:65-68.