

# 某水电站发电机转子绝缘降低原因 分析与处理

瞿大林, 肖启露, 李侯小, 刘鹏

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

**摘要:**水轮发电机转子绝缘降低将严重威胁机组的安全稳定运行,甚至导致发电机故障跳闸而影响到电站出力,造成电网负荷波动。阐述了某水电站发电机转子的主要结构,针对机组运行过程中发生的转子绝缘降低问题进行了深入分析,最终采取有效措施解决了转子绝缘降低问题,对处理发电机运行过程中出现的类似问题具有一定的参考价值。

**关键词:**发电机;转子绝缘;分析;处理;水电站

**中图分类号:**TV7;TV734;TV738

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2019)01-0116-05

## 1 概述

对于水轮发电机而言,当其转子回路发生一点接地故障时,由于转子绕组没有形成短路回路,接地点并没有故障电流,所以并不会产生严重的后果。但是,如果继续发生第二点接地故障,部分转子绕组将被短接,接地点流过的故障电流将烧伤转子本体,部分励磁绕组被短接以后气隙磁场发生的畸变会造成转子振动的加剧。此外,转子两点接地后还可能发生轴系和汽轮机的磁化。这些都严重威胁水轮发电机组的运行安全。因此,当发电机转子绝缘出现降低的情况时,一定要及时分析绝缘降低的原因并进行处理。

某水电站共安装 8 台立轴式水轮发电机组,单机额定出力为 600 MW,总装机出力为 4 800 MW。发电机励磁系统采用自并励数字式静止可控硅励磁,发电机的额定励磁电压为 295 V,额定励磁电流为 2 770 A,转子磁极对数为 18 对。根据《电力设备预防性试验规程》DL/T596—1996 要求,采用 1 000 V MΩ 表测量转子绕组的绝缘电阻值,在室温时一般不小于 0.5 MΩ。

该水电站发电机转子由转子支架、磁极、磁轭、转子引线等部分组成,转子磁极共 36 个,主要由磁极铁心、磁极线圈、阻尼绕组等组成。

### 1.1 转子引线

该发电机转子引线的正负极分别从 #1 磁极、#2 磁极引出,沿转子支架斜立筋通过转子中心体沿顶轴内腔向上到达集电环,并分别与集电

环正负极用螺栓把合。转子引线俯视图、转子引线剖面图分别见图 1 与图 2。

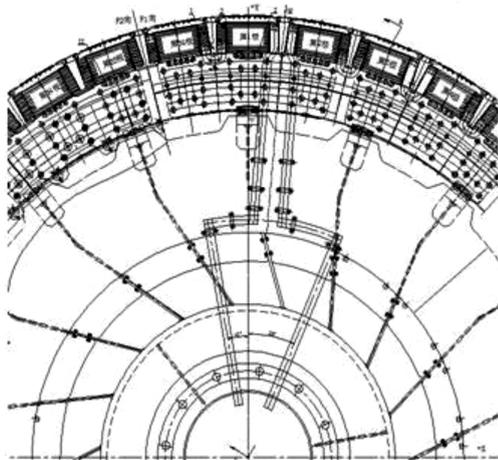


图 1 转子引线俯视图

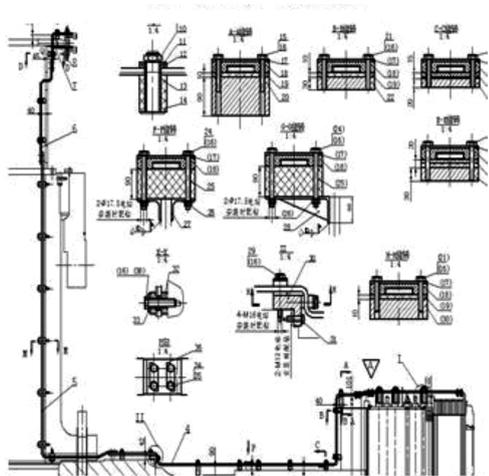


图 2 转子引线剖面图

收稿日期:2018-09-05

## 1.2 集电环

电站集电环由集电环支架、集电环、绝缘套管等组成。集电环安装在上端轴上,由周围同心分布的绝缘螺栓经法兰把合。集电环装配有一筒形外罩,该外罩与发电机室把合,并与发电机通风冷却系统隔绝。集电环固定在转轴上,随机组转动时与电刷滑动接触,将励磁电流传递到转动中的励磁绕组之中。集电环俯视图见图3。

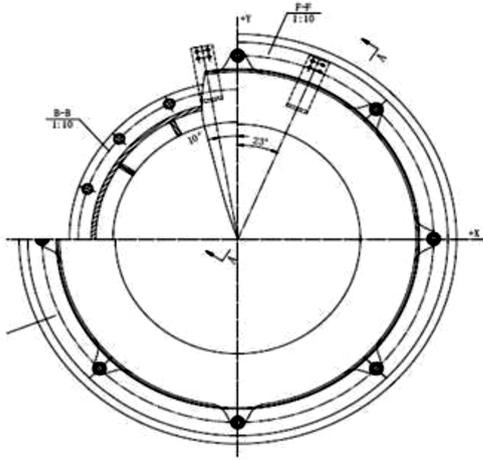


图3 集电环俯视图

## 1.3 刷架

励磁电缆正负极从励磁柜内引出,分别接至滑环室内刷架正负极上,用螺栓进行把合。刷架正负极通过整圆上6个支撑螺栓将刷架正极环与刷架负极环连接并固定,6个支撑螺栓上均套有绝缘套管进行绝缘隔离。刷架支撑螺栓情况见图4。

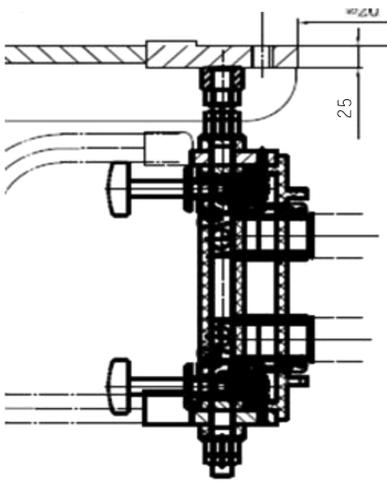


图4 刷架支撑螺栓图

## 2 出现的故障

2017年8月,该水电站工作人员在巡检过程中发现#1发电机转子接地保护装置上转子绝缘值在175~220 kΩ之间变化(正常为保护装置能显示的最大值300 kΩ,报警值为10 kΩ),接地参考位置 $\alpha$ 在20%~25%之间变化(正常为50%)。工作人员立即密切监视#1发电机转子绝缘情况,并立即排查其余机组转子绝缘情况,排查情况见表1。

表1 #1~#8机组转子绝缘电阻及接地位置数据表

机组	装 置			
	注入式测量 电阻/kΩ	注入式测量 位置/%	乒乓式测量 电阻/kΩ	乒乓式测量 位置/%
#1	225	24.88	225	20.12
#2	300	50	184	67.97
#3	300	50	300	50
#4	300	50	300	50.48
#5	300	59.95	300	50.5
#6	300	51.36	300	47.29
#7	300	50	300	51.61
#8	300	50	300	50

从表1中发现,#1、#2发电机转子绝缘在线监测电阻值有下降现象,保护装置显示接地位置存在跳变现象。由于保护装置的最大显示值为300 kΩ,后续将#1~#8发电机逐台停机后测量转子绝缘并与最近一次测量值进行对比,其数据见表2。

表2 停机后测量绝缘与最近一次测量值对比表

机组	停机后测量绝缘值/MΩ	最近一次测量值/MΩ
#1	0.09	870
#2	0.234	936
#3	369	885
#4	478	1 310
#5	395	847
#6	425	1 250
#7	384	1 340
#8	514	1 140

从表2中发现,#1~#8机组停机后的测量绝缘值与最近一次测量绝缘值对比均有明显降低。其中,#1、#2机组降低最多,且绝缘值已经降低至规程要求以下。

## 3 故障原因分析

### 3.1 发电机转子受潮

水轮发电机组的运行环境中空气湿度较大。由于发电机的转子绝缘受到空气中的水分侵蚀,若发电机停机备用时间过长,就有可能出现绝缘降低的情况。

针对该原因进行分析得知:由于该电站机组年运行小时数较大,机组连续停机备用时间较短,且电站规定一旦机组连续停机备用 10 d,就要将机组开启至空载运行 1 h。该电站在发现发电机转子绝缘有降低趋势时,部分机组处于正常运行状态,因此排除了该原因。

### 3.2 油雾影响

水轮发电机设有上导、下导、推力、水导油槽及诸多的油管路。若发电机的油槽密封不严,将产生油雾甚至渗油,这些油雾在机组运行时受环境温度和风的影响大量发散并吸附在发电机各设备的表面,尤其是在发电机定转子线圈和铁芯表面,从而使灰尘更容易吸附在这些设备上。这些油和灰尘使转子线圈表面更容易脏污、受潮,进而导致绝缘下降。

针对该原因进行分析得知:该电站在 2017 年度检修工作中,对发电机各部位油槽进行了严密封闭。在水导轴承盖板装配了吸油雾装置,机组各部位油雾散发量在正常范围内,因此而排除了该原因。

### 3.3 机组振动摆度影响

发电机运行时的振动摆度数据是反映发电机运行工况的重要依据之一。当发电机振动和摆度超标时,会导致机组滑环处振摆超标,碳刷振动增加,进而导致碳刷磨损增多。另外,机组振动摆度越限,发电机转子磁极的铁芯和绕组相对振动增加,对发电机绝缘亦很不利。

针对该原因进行分析得知:该电站在 2017 年度机组 C 修时,对发电机进行了盘车检查,调整了发电机轴线以及轴承轴瓦间隙。调整后的发电机各部振动及摆度在定值范围内。因此,排除了该原因。

### 3.4 转子绝缘老化

发电机长期连续运行、转子高速转动及励磁过程中将产生大量的热量,使转子周围的温度大幅度升高。转子的绝缘材料长期处于高温之下,加速了转子线圈绝缘材料老化、劣化甚至出现局部脱落现象,进而导致绝缘电阻降低。

针对该原因进行分析得知:从电站水轮发电机运行时各部温度情况看,发电机各轴承瓦温、定子线圈温度、空冷器进出风温度等均在规程要求的正常范围内。在年度检修工作中,该电站全面

检查了转子及其各附属部件的情况,检修后测量转子绝缘值正常,故可排除该项为转子绝缘降低的主要原因。

### 3.5 转子回路设备绝缘破坏

发电机励磁系统交流、直流回路中若出现电缆绝缘破损、金属异物接地、转子本体部件破坏等情况时,都将导致转子绝缘降低。在这种情况下,监控系统偶发瞬时接地故障报警,严重时将导致机组跳闸停机。

针对该原因进行分析得知:该电站机组虽出现了转子绝缘降低的情况,但未出现转子瞬时接地故障和机组跳闸的情况。停机后对励磁系统、转子回路进行全面检查未发现电缆绝缘破损、金属异物接地、转子本体部件破坏等情况。因此,可排除该项原因。

### 3.6 集电环碳粉堆积

上述提到,集电环室中集电环随机组转动时与电刷滑动接触,将励磁电流传递到转动中的励磁绕组之中。集电环与电刷之间的滑动摩擦会形成碳粉,时间一长就会在集电环、集电环支架、刷架等部位上堆积形成接地通道<sup>[6]</sup>,进而造成转子绝缘降低。

针对该原因进行分析得知:在机组停机后,工作人员对各发电机集电环室进行全面检查发现,在 #1、#2 机组集电环绝缘支撑及刷架绝缘支撑处碳粉堆积情况严重,#3~#8 机组集电环绝缘支撑及刷架绝缘支撑处也有碳粉堆积,但较 #1、#2 机组堆积量偏少。

## 4 故障处理

### 4.1 碳粉堆积原因分析

#### 4.1.1 集电环绝缘支撑绝缘距离偏短

该集电环绝缘支撑高度较低、形状为凹形,磨下的碳粉容易堆积在凹形的绝缘支撑上,通过堆积的碳粉,在集电环与地之间形成了爬电通道,造成集电环的对地绝缘电阻偏小。

#### 4.1.2 集电环原因

将 #1、#2 机组与其余机组碳刷的磨面进行对比发现 #1、#2 机组的碳刷磨面较为粗糙,具有较深的沟槽,用手感觉有明显的凹凸感。而其余机组碳刷的磨面基本为镜面,手感较为光滑。由此判断有可能存在集电环水平度、表面圆跳动值大、集电环表面粗糙度大等因素造成碳刷磨损

量大。

#### 4.1.3 碳粉收集装置效率低

在#1机组转子绝缘电阻降低期间,电厂对发电机碳粉收集装置进行了改造,增加了六台风机以增强其吸尘能力,但实际效果并不明显。同时,在机组停机备用期间,检查发现碳粉收集装置内部只收集到少量的碳粉,装置底板几乎无碳粉。由此可知,碳粉收集装置效率低,导致无法将磨下的碳粉有效收集是造成碳粉堆积的原因之一。

#### 4.1.4 大轴孔洞封堵

该电站在2017年度机组C修中按照厂家给出的方案对集电环处的大轴孔洞进行了封堵,封堵前有大量的碳粉通过该孔洞进入转子中心体内部,封堵后碳粉无法进入转子中心体而全部堆积在集电环部位,导致集电环绝缘支撑处堆积的碳粉偏多、转子绝缘电阻变低。

#### 4.1.5 碳刷更换量过大

该电站在2017年度机组C修中更换了大量碳刷。其中,#7~#8机组更换了近70%,#1~#6机组更换量达到了90%。碳刷更换初期至稳定时间段内碳刷端面与集电环摩擦是由线到面的过程,该时间段较正常时间段碳刷的磨损量较大,故产生的碳粉更多。

### 4.2 处理措施

当发现集电环碳粉堆积严重后,电站工作人员先后对#1~#8机组集电环碳粉进行了清扫。清扫完成后,#1、#2机组转子绝缘值上升明显,#3~#8机组绝缘值略有上升。具体数据见表3。

表3 碳粉清扫前后转子绝缘值表

机组	清扫前测量绝缘值/MΩ	清扫后测量绝缘值/MΩ
#1	0.09	705
#2	0.234	751
#3	369	405
#4	478	565
#5	395	484
#6	425	463
#7	384	486
#8	514	576

由于上述处理方法只能暂时消除转子绝缘降低情况,并不能彻底消除缺陷,所以,该电站又先后进行了以下几个方面的技术改进。

#### 4.2.1 集电环改造

(1)对集电环表面进行加工处理,使安装后的

集电环振动、跳动值达到要求;

(2)所加工的集电环必须达到粗糙度要求,防止因集电环的表面粗糙度过大使碳刷的磨损加快而产生过量的碳粉,导致绝缘降低;

(3)因集电环的沟槽棱角可能会产生“切割”碳刷的效果,产生过量的碳粉,遂将集电环的沟槽倒成圆角;

(4)为了防止碳粉从两个集电环之间的间隙遗漏,必须使集电环与集尘罩之间形成一个相对密闭的空间,故将集电环的上环与下环之间的间隙用绝缘挡风板将其密封,以提高碳粉的收集效果。

#### 4.2.2 刷架的改造

(1)对刷握位置进行重新优化布置,使刷握更加集中于吸尘口前端,普遍离吸尘口比较近,使该处的抽风量更大、风速更快、产生的碳粉更容易被吸出,更加有利于碳粉的收集。优化后的刷架俯视情况见图5。

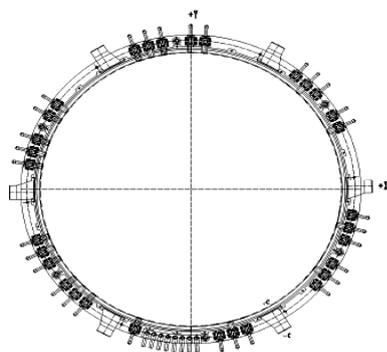


图5 优化后的刷架俯视图

(2)将吸风口数量从三个增加到六个,吸尘口由直管结构优化为喇叭口结构,增加了风量和吸风面,有利于碳粉收集。优化前后的吸尘口结构对比情况见图6。

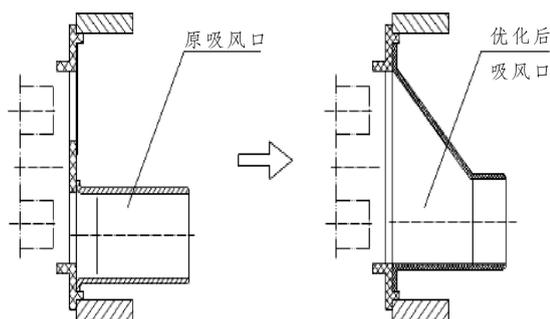


图6 优化前后的吸尘口结构对比图

(3)刷架上端绝缘套的爬电距离很短。通过增大绝缘套、侧面开沟槽的方式,增加了爬电距离;

(4)在下导电环上安装毛刷及集尘挡板,在加强密封的同时,还可以兜接住落下的碳粉,防止碳粉飘落。

#### 4.2.3 碳粉收集装置及管路优化

(1)更换了碳粉收集装置。除尘风机为原装进口、功率更大的风机。将过滤材料由滤袋改为滤筒,使过滤面积更大,拆换、清洗亦更方便,碳粉收集效果更好;

(2)原碳粉收集装置系通过一根软管连接除尘器和一个吸风口。改进后,通过两根软管连接一台除尘器和两个吸风口,优化后的设备除尘效果大大提高。

#### 4.3 处理效果

该电站在对发电机集电环堆积的碳粉进行清扫之后,发电机转子绝缘情况恢复到正常范围内。

经过上述几项技术改进,降低了机组运行过程中碳粉的产生量,提高了碳粉装置的收集效果,碳粉堆积严重的问题得到了大大改善。

#### 5 结 语

水轮发电机组转子绝缘降低问题在很多水电站均有出现,甚至很频繁,使机组被迫停运,给电站造成了一定的经济损失和安全隐患。笔者介绍的某水电站机组针对转子绝缘降低问题采取的有效措施对类似电站发电机转子的日常维护及故障处理具有一定的借鉴作用。

##### 作者简介:

- 瞿大林(1991-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事水电站运行技术与管理工作的;
- 肖启露(1989-),男,四川西昌人,助理工程师,学士,从事水电站运行技术与管理工作的;
- 李侯小(1994-),男,陕西榆林人,助理工程师,学士,从事水电站运行技术与管理工作的;
- 刘 鹏(1994-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事水电站运行管理工作。(责任编辑:李燕辉)

(上接第 101 页)

经营后需要在注册地进行抵扣。建筑企业应当充分利用信息化手段来提高工作效率,加强后台集中管控,降低合同风险。信息化建设一方面能够将合同签订、审核时间等有效地缩短;另一方面亦可以实现电子化管理,利用电子增值税专用发票进行管理,从而避免出现物资采购合同管理风险。

#### 4 结 语

营改增已全面实施,其对施工企业经营活动的各个环节影响很大。因此,建筑施工企业要进一步加强学习、理解和掌握其内涵与实质。企业

在实施营改增后的合同管理过程中,应当建立完善的合同保障体系,建立健全合同管理体系,提高管理人员的能力与素质,从而提高合同管理的整体水平。笔者从多个角度分析了企业在生产、销售以及经营各个合同管理环节存在的问题并提出了解决方法,对树立企业的良好形象、提高企业的经营效益、提高其市场竞争力、促进企业在建筑市场良好的生存和发展具有重要的作用。

##### 作者简介:

- 冉 念(1970-),女,四川都江堰人,高级工程师,学士,从事工程技术与经营管理工作。(责任编辑:李燕辉)

(上接第 115 页)

- [5] Dawson E M, Roth W H. Drescher A Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999,49(6): 835-840.
- [6] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [7] 连锁营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):406-411.
- [8] 郑 宏,李春光,李焯芬,等.求解安全系数的有限元法[J].岩土工程学报,2002,24(5):626-628.
- [9] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [10] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩

质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程报,2003,22(2): 254-260.

- [11] 邓建辉,魏进兵,闵 弘.基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I);滑带土抗剪强度参数反演分析[J].岩土力学,2003,24(6):896-900.

##### 作者简介:

- 邵 兵(1990-),男,江西九江市人,工程师,硕士,从事水电站设计工作的;
- 方 丹(1980-),男,安徽黄山人,教授级高级工程师,硕士,从事水电站设计工作的;
- 万祥兵(1978-),男,江西南昌人,教授级高级工程师,硕士,从事水电站设计工作的;

(责任编辑:李燕辉)