

金沙峡水电站发电机定子线圈绝缘击穿原因分析及改造方案

Analysis of the Causes of Insulation Breakdown in the Generator Stator Coil of Jinshaxia Hydropower Station and the Improvement Plan

桑杰才让

Sangjicairang

青海黄河上游水电开发有限责任公司 中国·青海 西宁 810000

Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

摘要: 金沙峡水电站发电机自投产以来定子线圈多次击穿,影响机组安全稳定运行,论文通过对发电机定子线圈绝缘击穿原因进行分析,从改造的原则等方面进行了论述,提出了初步改造方案。

Abstract: Since the generator of Jinshaxia Hydropower Station was put into operation, the stator coil of the generator has repeatedly broken down, affecting the safe and stable operation of the unit. The paper analyzes the reasons for the insulation breakdown of the generator stator coil, discusses the principles of transformation, and proposes a preliminary transformation plan.

关键词: 绝缘; 击穿; 分析; 方案

Keywords: insulation; breakdown; analysis; solution

DOI: 10.12346/etr.v5i5.8038

1 基本概况

金沙峡水电站发电机组制造厂家为兰州电机股份有限公司,发电机型号 SF20-20/4250,额定功率 20MW,额定电压 10.5kV,额定电流 1293.7A,额定转速 300r/min;定子槽数 216 槽,采用框式线圈叠绕组,节距 1-10,并联支路数 4。定子由工地组圆叠片,全圆共 18 片,每片 12 槽。

首台机组(4号机组)于 2007 年 3 月 30 日并网发电,9 月 3 台机组全部并网发电。

机组投产至今,共发生 7 次定子线圈绝缘击穿,其中 2018 年以来发生 4 次线圈绝缘击穿。

2 绝缘击穿原因分析

①发电机定子线圈制造时线圈端部形状不规则,定子线圈制造质量、加工工艺存在缺陷;线圈匝间、线圈本体绝缘薄弱;线圈端部之间间隙不均匀、部分线圈之间无间隙等问题。

② 2007 年至 2018 年,机组最高运行温度达 119℃,发

电机定子线圈长期在高温下运行,导致线圈绝缘薄弱,严重影响发电机组使用寿命。2018 年对四台发电机组空冷器进行了改造,定子线圈温度降低了 15℃~20℃,但是线圈运行温度仍然偏高,最高运行温度达 105℃,比机组正常运行温度高 30℃左右,发电机通风设计存在先天性缺陷。

3 定子改造原则

本次定子改造,必须保持定子的外形尺寸(包括定子直径,高度等)与原机一致,确保与原机组未改造部件(包括上机架,转子等)之间的配合不受影响且新设计制造的发电机定子优化各项参数,彻底解决金沙峡水电站发电机定子存在的以上问题。发电机定子整体更换。线圈形式由原圈式改为条式线圈。充分考虑高海拔(▽ 2200m)使用环境条件下的降效因素,对设备(材料)作出海拔修正。更新设计发电机上、下挡风板。更换发电机 4 个空气冷却器。改造后发电机定子的各项电磁参数与原转子磁极、励磁设备、保护设备参数要求相适应,保证发电机安全稳定运行。

【作者简介】桑杰才让(1978-),男,中国青海人,工程师,从事水电站生产技术管理研究。

4 改造方案

4.1 发电机定子

4.1.1 发电机定子机座

①定子机座具有足够的刚度和强度，能承受上机架及其支持件的重量，能安全地承受在运行时由于突然短路故障引起的瞬态力矩及半数磁极短路产生的单边磁拉力，并具有防止铁心翘曲和适应定子铁心热膨胀的能力。应能承受在各种运行工况下所受的热膨胀力、额定运行工况产生的切向力及定子铁芯通过定位筋传来的 100Hz 交变力等。定子机座应能承受贮存、运输及安装引起的应力而不产生变形。定子机座应能承受把整体定子（无绕组）从安装场吊入发电机所在基坑的过程中引起的应力而无有害变形。定子机座应具有支撑上机架及其构件的能力，机座钢材的材质选用 Q235B。发电机定子机座外直径尺寸和高度尺寸与原机保持一致，机座与原基础板之间增加一块调整垫板，便于调整新机座水平。调整垫板在厂内与机座同钻铰径向销孔，并将径向销点焊于调整垫板上，在工地定子安装调整好位置后将调整垫板焊于原基础板上。工地根据实际情况加工该调整垫板，调整水平和高程。

②工地安装时连接相关接口尺寸保持不变，发电机主、中引出线在机座引出孔位置及尺寸保持不变。定子上、下端消防水管引出位置保持不变^[1]。

③定子机座含顶环、上环、中环、下环、底环等各层环板，各层环板与机座外壁及层间立筋均采用钢板焊接结构，其中下环作为定子铁心下端部压紧用大齿压板。为缩短工地安装周期，定子机座采用整圆结构，不分瓣。机座与铁心、线圈完成装配及试验后，整体运至工地，安放在埋入在混凝土内的基础板上，通过销钉、螺栓使二者结合定位。

4.1.2 发电机定子铁芯

①定位筋安装及铁芯叠装工艺应符合《水轮发电机定子现场装配工艺导则》（SD287-88）及相关机械行业标准。

②发电机定子铁芯应采用不低于 50W270 的优质低损耗、高导磁、无时效、不老化的优质无取向冷轧硅钢片，叠装成整圆，厚度 0.5mm。

③铁芯冲片毛刺小于 0.01mm，两面喷涂 F 级绝缘漆，漆膜厚薄要均匀，双面漆膜厚度不超过 0.025mm，表面无明显机械损伤，平均绝缘电阻小于 50mA。

④上、下端压指采用高强度无磁性合金钢以减小端部磁场引起的附加损耗导致端部发热；齿压板的水平度、齿间高差、间距符合设计要求。

⑤发电机定子铁芯下端应采用大齿压板结构，上、下两端铁芯台阶处用双组份硅钢片胶粘剂粘成整体，以提高齿部整体性。

⑥发电机定子铁芯交错叠片，叠片槽部公差不大于 0.2mm。

⑦发电机定子铁芯压紧系统应采用具有优质高强度性能的螺杆及防止铁芯长期运行后松动的优质蝶型弹簧压紧结

构，为保证压紧效果良好，发电机定子铁芯在承包商工厂应采用整圆叠装、两端胶粘、液压拉伸器配合分配器分段压紧、铁损试验后整体压紧的工艺措施，以保证铁芯在运行期间不致松动且不伤及漆膜。乙方的投标文件中应提交叠片方法。夹紧系统应能保持铁芯的夹紧压力，并使铁芯在工作期间不致松动。

⑧分段压紧时，圆周方向高度差及整体压紧后，铁芯上端槽口齿间的波浪度均不超过设计要求。

⑨需经电磁和通风计算，确定发电机定子铁芯内的通风沟宽度和铁芯分段数，采用合理的通风沟数使空气流动顺畅平稳、铁芯冷却均匀、充分、风阻损耗最小。6.2.4.9 机座与铁芯之间采用单鸽尾筋的连接结构^[2]。定位筋固定在定子机座上，与托板间保持一定距离，防止因铁芯热膨胀而产生的挤压应力。定位筋和铁芯之间的结合，设计时应考虑到允许定子铁芯的径向热膨胀，以尽量减少定子铁芯的瓢曲变形和应力，保证铁芯的圆度和同心度。定位筋与托块、托块与机座的焊接应能承受发电机突然短路产生的切向力和磁拉力产生的径向力同时作用时的剪应力。

⑩铁芯质量按 JB3233、GB8564 及 SD287 标准或新出标准进行质量验收，叠装后的铁芯为优等品。

⑪发电机定子铁芯在对称负载工况下，100Hz 的允许双幅振动量应不大于 0.03mm。发电机在设计时应考虑水轮机的振动特性和电网频率的倍频并避免与之发生共振。

⑫发电机定子组装完成后，测量定子圆度，各半径与平均半径之差不应大于设计空气间隙值的 $\pm 5\%$ 。

⑬铁芯叠片及压紧的施工工艺要求、技术规范及标准等由乙方提出，所有提出的规范和标准应经甲方审查并认可，但不减轻乙方应承担的责任。铁芯叠装质量由乙方负责。

⑭通过电磁和通风计算，确定定子铁心内的通风沟宽度和铁心分段数，采用合理的通风沟数以使空气流动顺畅平稳、铁心冷却均匀、充分、风阻损耗最小。通风槽钢为轧制无磁性不锈钢，应具有减小铁损和提高机械性能的双重作用。

⑮定子铁芯内径的尺寸应允许通过定子内腔吊出发电机下机架及水轮机的所有可拆部件。

4.1.3 发电机定子线圈

①发电机定子线棒应采用三维设计，通过数控成型机制造。

②发电机定子绕组应为双层条式波绕组、单支路、Y 形连接，发电机定子绕组采用涤玻烧结电磁线，其导电系数需符合国家标准，绕组制造结构能便于现场嵌装和检修。线圈的材质选用 T2 紫铜，其中 Cu 含量 $> 99.9\%$ 。

③发电机定子线棒应采用先进的 VPI 绝缘技术或多胶模压定子线棒绝缘技术，绝缘等级为 F 级，以保证其具有更低的介质损耗增量，更高的击穿场强，更高的耐热老化寿命和耐热老化寿命。

④成型的线圈应保证导体周边绝缘厚度均匀、具有良好的电气性能、机械性能、抗老化耐潮湿性能和具有不燃或难燃特性。

⑤发电机定子线棒的端部绝缘应采用防晕层与主绝缘一次成型的结构。单个发电机定子线棒能保证在 1.5 倍的额定线电压下不产生电晕,整机在 1.1 倍额定线电压下,端部无明显晕带和连续的金黄色亮点。

⑥线圈采用先进合理防晕结构,能保证承受发电机运行 35 年以上的电腐蚀破坏。

⑦单根线圈几何尺寸满足设计要求,其端部截面尺寸正、负偏差符合设计要求。

⑧发电机定子绕组应采用立式嵌线方式,线圈在发电机定子槽内能与定子铁芯配合严密。

⑨发电机定子线棒应具有小于 360° 的新型换位方式,以最大限度减少损耗和股间环流,降低运行中股间温差。

⑩线圈槽内固定方式应采用槽楔和波纹板固定的结构,使发电机定子线棒在冷热压状态下均有一定压力,并能补偿绕组绝缘的老化收缩,使绕组、槽楔能长期运行后牢固而不松动。

⑪线圈端部的固定方式应采用非磁性不锈钢端箍刚性支撑。线圈的端部和连接线均应有牢固支撑及绑扎能力,端箍与线圈之间加毛毡,能保证线圈在各种运行工况下和长期运行后不发生下沉,并能防止发电机在最严重的短路情况下可能发生的振动和变形。

⑫定子线棒嵌装和汇流母线安装,其工艺应符合 SD287-88《水轮发电机定子现场装配工艺导则》。

⑬线圈接头的焊接采用银铜焊(优先采用中频焊),加工平整之后,套以绝缘盒。

⑭接头绝缘采用环氧树脂浇灌,接头与绝缘盒间隙应均匀,线圈端头绝缘与盒的搭接长度应符合设计要求,浇灌饱满,浇灌严实,无气孔和裂纹。

⑮制定先进合理的下线工艺手册,线圈设计和制造尺寸也应合理。线圈嵌装后,额定电压下,定子线棒表面对地电位应符合设计要求,并 100% 测试。

4.1.4 发电机定子端箍及铜环

①固定绕组端部的端箍应采用非磁性材料。其他固定部件如槽楔、槽口垫块、斜边垫块等材料都应采用可靠的、先进的材料、工艺和结构,其绝缘等级均为 F 级;

②所有绕组的连接,包括绕组端部接头、极间连接线和引线铜排等均应采用银铜焊接,保证具有足够的机械强度和良好的导电性能。

4.1.5 发电机定子测温装置

①发电机定子绕组测温装置应采用改造成与定子层间垫条外形尺寸一致的新型 RTD 产品;

②测温槽应采用轭部开槽的专用定子扇形片叠装,测温铁芯 RTD 需自带有屏蔽层测温电缆,测温信号不应受到电磁干扰,并可直接引入布置在发电机定子机座或机坑壁上的

中间端子箱,中间无转接点,不能发生虚接现象。

③测温装置引线护套采用耐高温、耐腐蚀的材料,引线纵向耐压力 $\geq 15N^{[1]}$ 。

④测温装置绝缘等级: F 级,常温绝缘电阻 /500VDC: $\geq 100M\Omega$,绝缘强度: $\geq 1000\sim 2500V AC 1min$,采用三线制。

⑤测温装置应选用适用于金沙峡水电站发电机定子绕组、铁芯的测温元件,具备高精度、高稳定性、耐高温、高绝缘、防电晕、抗磁化的优质产品,使用寿命不小于 15 年。

4.2 发电机出线、中性点引出线

为方便发电机定子引线检修及试验,主引线及中性点引出线与外部封闭母线间连接,由原来的铜排连接,改造为铜编织线的软连接,断口间距大于 300mm。

4.3 发电机空气冷却器

①考虑到发电机定子机座、铁芯均已更换,为了更好地跟改造后冷却系统匹配,需更换空气冷却器,满足发电机冷却要求。

②空气冷却器选型应使其风阻和过流面积与通风系统相匹配,以保证通风参数和电机温度指标的实现。空冷器数量 4 只。设计时应考虑冷却水量和水压条件。冷却器设计运行水压力为 0.2~0.3MPa,水压试验水压力为 0.6MPa,历时 60min 无泄漏。

③空气冷却器冷却容量在设计时应考虑足够裕度,保证在正常情况下停用 1 个空气冷却器仍能在额定出力下连续运行,各部温升不超过规定值。冷却器设计时应充分考虑电站所处大通河水中含砂重的特点,选用耐磨蚀、传热性能好 T2 紫铜的无缝管,铜散热片。散热部件应牢固地焊接在冷却管上,冷却管与承管板及承管板与水箱盖的连接应保证连接处密封性能良好。保证其使用期间安全运行,使用寿命不低于 12 年^[4]。

4.4 发电机上、下挡风板

为保证新设计线圈上、下端部的布置空间,需重新设计上、下挡风板。挡风板采用玻璃钢材质,应具有重量轻、强度高、不导磁,便于拆装等特性。

4.5 定子整体吊装专用工具、线圈焊接专用焊机

①因发电机定子采用制造厂内叠片、下线,整体运至工地安装的改造方案,为防止吊装过程中机座发生起吊变形,挤压铁芯,造成铁芯槽部变形,损伤发电机定子线圈,需配置符合电站厂房安装现场实际情况的定子整体起吊工具;

②为方便发电机定子线圈维护、检修,需配置发电机定子线圈连接专用焊机。

参考文献

- [1] GB7894-2009 水轮发电机基本技术条件[S].
- [2] GB/T 8564-2003 水轮发电机安装技术规范[S].
- [3] DLT596-2021 电气设备预防性试验规程[S].
- [4] 罗义.影响水轮发电机定子线圈主绝缘寿命的原因及防范措施[J].水电与新能源,2015(8):57-59.