

1600千瓦水轮发电机定子线圈改造

刘正贵

(四川省万县电力公司)

一、概 况

长滩水电站四台BCГ213/49-12型立轴悬吊式同步水轮发电机, 每台1600千瓦, 6300伏, 183安, 是保加利亚按ГОСТ5616-50标准设计, 1960年按ТИМ32-60标准制造的。1965年10月进行四台水轮发电机组安装。1966年6月, 1号和3号机组先后投入运行。由于设备不齐等原因, 2号机组和4号机组分别在1968年8月和1970年4月投入运行。

发电机定子线圈是ППД(似国产MEB)双纱包扁铜线 2.63×4.1 型线, 6根并绕。126槽, 双层迭绕, 单支路, 星形连接, 首尾端各三个出线头引出。每个线圈4匝, 匝间用沥青纸云母带ЛМЧ(似国产5031) 0.13×20 , 半迭包一层。槽部直线部分对地主绝缘是0.2毫米厚的ММЛЛ(似国产5831)虫胶云母箔卷包13.5层, 单边厚度2.7毫米, 外包一层K08型电缆纸。直线与端部搭接头部分, 用纸云母带ЛМЧ 0.13×20 , 半迭包5层。鼻子及端部一段, 用黑蜡带ЛЛЛ(似国产2110) 0.2×20 , 半迭包5层。引出线用纸云母带ЛМЧ 0.13×20 , 半迭包2层, 外面再用黑蜡带ЛЛЛ 0.2×20 , 半迭包2层。最后, 外面平包一层 0.2×20 棉织带。

线圈的有关试验如表1:

表1

序号	试 验 阶 段	计 算 公 式	试验电压(千伏)
1	匝间耐压		3(1000赫芝)
2	单个线圈铜线对地	$2.75U_N + 4.5$	22
3	线圈嵌线下槽前	$2.5 U_N + 4.5$	20
4	线圈嵌线下槽后, 未并头	$2.5 U_N + 2$	18
5	每相线圈对其它两相及地	$2.5 U_N$	15.75
6	运行交接试验	$0.75(2U_N + 1)$	10.2

定子线圈出厂工频耐压试验, 按ГОСТ5616-50标准第31-36条要求进行。

定子线圈原制造厂按ТИМ28-60标准进行下线安装工频耐压试验。

二、问题的提出

1969年8月, 由于2号水轮机泄水锥处的大轴吸力补气阀在运行中甩掉, 在负4.1米的吸出高度下运行时(因尾水渠的洪水位上涨, 一般是负1.7米的吸出高度), 洪水沿水

轮机和发电机的空心轴孔内上升,从发电机转子磁极引线头出口孔处溢出。运行中的离心力,使飞溅水滴浸透2号发电机定子线圈上端部引线四周,绝缘下降,相间短路,差动保护可靠动作,事故紧急停机,烧坏5个线圈。按照水电部1961年版《电气设备交接预防性试验规程》中局部更换发电机定子线圈的工艺过程和耐压试验标准,局部更换了9个线圈。

在处理1970年3月火灾事故中,发生误操作,将W800/28型机械液压自动调速器改为50%导叶开度的手动运行位置,发电机断路器分开后,机组处于长达三小时之久的高速运转中,硬质杂物随水的旋涡旋转(当时为扑灭大火,以免机组及电气设备烧毁,用炸药将压力钢管炸开,使压力前池的水浸淹厂房的机组及设备),将定子线圈上端部引线出口处四周全部擦坏,铜线裸露,无法修补,被迫将全部损坏线圈拔出更新。

备用的发电机定子线圈每台机9个,四台机共36个(1969年2号机局部更换时用了9个)。

火灾事故后,其余三台发电机定子线圈虽经清洗、干燥处理,但由于云母卷烘绝缘结构端部引线与连接线存在绝缘薄弱环节,决定分期分批全部更换三台发电机的定子线圈。

三、定子线圈绝缘结构改造情况

1970年4月,三台机组恢复生产后,我们将1号机已损坏的定子线圈全部拔出,实测了线圈的各种数据以及铁芯槽部的尺寸。实际绝缘情况为:槽底垫有 ΘB 电工绝缘纸板 $0.5 \times 16 \times 520$,槽绝缘 $\Theta B 0.2 \times 260 \times 585$,层间垫 $\Theta B 2 \times 15.5 \times 530$,楔下垫 $\Theta B 0.5 \times 16 \times 520$ 。铁芯槽部实测数据:槽宽 $15.7 \sim 16.3$ 毫米,槽深102毫米。

根据兄弟厂的意见并结合本厂实际情况,认为:如果采用原电磁线型号 $\Pi C D$ (似国产SBECB) 2.63×4.1 型双玻璃丝包扁铜线,6根并绕(双排三股),按国产6300伏云母带连续浸胶绝缘,则线圈槽部宽度尺寸略大,安装线圈时可能会出现困难;而国产标准又无4.1毫米宽边等级,决定减少扁铜线宽度尺寸一级(由4.1毫米减到3.8毫米),电磁线型号改为TBR 2.63×3.8 扁铜软线,玻包之后,电磁线型号为SBECB(2.63×3.8)/(3.04×4.13)双玻璃丝包扁铜线,6根并绕。

1970年4~6月,将原保加利亚的线圈图纸(无梭形图)译出。将原厂家设计标准中,发电机冷却空气温度 35°C ,改为按我国规定发电机冷却空气温度 40°C 为标准设计值计算。

线圈对地绝缘:采用云母带连续绝缘、经真空浸胶处理的绝缘结构。每个线圈4匝,匝间用5032绸云母带 0.14×20 ,半迭包一层,真空浸1011号胶一次。槽部用5032, 0.14×20 ,半迭包8层。端部用5032, 0.14×20 ,半迭包7层。外面平包一层 0.1×20 无碱玻璃丝带,全部真空浸1011号胶两次。引线从20毫米起至50毫米斜边止,半迭包2层5032,再半迭包一层 0.1×20 无碱玻璃丝带。槽底、层间和楔下均垫0.5毫米纸板,端垫工字形纸片,槽楔3240环氧玻璃布板。

连接线:相内用2430黑玻璃漆布带 0.15×20 ,半迭包6层(或5032, 0.14×20 ,半迭包7层),外平包 0.1×20 无碱玻璃丝带;极间与引出线,用2430, 0.15×20 ,半迭包7层(或5032, 0.14×20 ,半迭包8层),外平包 0.1×20 无碱玻璃丝带。

端箍环:先刷1211号沥青晾干漆一次,用5032, 0.14×20 ,半迭包9层(或2430,

0.15×20, 半迭包8层), 外平包0.1×20无碱玻璃丝带; 再刷1211号漆一次。

全部线圈安装完毕后, 端部喷1321号晾干灰瓷漆两次。

安装时, 嵌线圈的操作规程和绝缘工艺规范, 按水电部水电建设总局《水轮发电机安装》, 水电部1961年版《电气设备交接和预防性试验规程》中的全部更换定子线圈和《中小型水轮发电机定子, 转子, 励磁机耐压规范》中的Q/D81-65标准要求进行操作和耐压试验。

准备好嵌线用的工具和材料, 对定子铁芯槽部进行清扫吹灰处理后, 将新线圈在加热箱内加热至60-70℃取出, 待冷却到40-50℃时, 进行入槽嵌放。必要时, 可抽查几个做一次嵌线前的工频耐压试验, 试验电压为21830伏。嵌线应细心, 相互配合, 防止损伤绝缘; 用绳索拉抬线圈时, 用力应平稳均匀。入槽后, 视工艺和绝缘情况, 可以逐个做耐压, 也可以二至四个一起做耐压。下槽后其它线圈未连接前, 线圈对机座作16200伏的耐压。全部线圈连接完毕后烘干, 测量线圈对地绝缘电阻, 并进行分相工频耐压试验, 试验电压为13600伏。

线圈嵌放后, 打好干燥过的槽楔, 整修引出连接线, 将事先准备好的并头套(或挂过焊锡H₂S₂Pb58-2, 即ΠOC-40的φ0.8-1.5毫米铜线作札线), 将各线圈接头热熔锡焊或电弧焊, 焊接后应进行焊头质量检查。可采用焊接头压降法、发热法测量接触电阻, 分析判断焊接质量的优劣。测得每相线圈的直流电阻, 相差仅2%。

按绝缘规范要求, 包好引线、相内、极间连接线的绝缘后, 烘干, 对线圈端部喷两次1321号晾干灰瓷漆。

其它电气试验完成后, 转子吊入定子前, 根据情况可以作一次2.5-3倍额定电压的直流耐压试验, 并测量其泄漏电流。

投入运行前的交接试验, 按 $0.75(2U_N+1000)=10200$ 伏进行。

四、改进前后线圈温升与损耗的对比分析

电磁线由2.63×4.1改为2.63×3.8, 绝缘结构由云母卷烘绝缘改为云母带连续浸胶绝缘。根据《电机设计》的有关理论与计算公式, 计算出电流密度, 绝缘温降, 线圈铜损和发电机效率, 结果见表2。

表2 线型及绝缘改造计算结果对照表

项 目	结 构	旧 线 圈 云母卷烘绝缘	新 线 圈 云母带连续浸胶绝缘
1. 线 型	ΠΠД	$\frac{2.63 \times 4.1}{2.98 \times 4.53}$	SBECB $\frac{2.63 \times 3.8}{3.04 \times 4.13}$
2. 电流密度安/米 ²		2.96	3.21
3. 绝缘温降, ℃		14.55	17.00
4. 线圈温升, ℃		29.81	32.82
5. 线圈铜损, 千瓦		11.96	12.96
6. 发电机效率, %		95.36	95.29

当线负荷、定子铁芯尺寸确定后,定子绕组绝缘温降与电流密度和绝缘厚度成正比。线型改小,电流密度增加,绝缘厚度(尺寸)增大。通过计算,新线圈的温降比旧线圈高2至3度,所以线圈温升也有改变,新线圈比旧线圈高3至4度。

由于导线截面改变很小,而且原厂家取的电流密度 $2.96\text{安}/\text{米}^2$ 远低于国产同类型机组的 $4-5\text{安}/\text{米}^2$,故铜损增加相当少,对发电机的效率影响甚微。

五、新线圈与旧线圈运行情况对比

1972年5~10月,1号机全部更换上新线圈,试验投入运行。十一年来,夏季线圈最高温度在 $65-70\text{℃}$ 。

1982年2月至1984年1月,先后全部更换了3号、4号机的定子线圈。

从已更换的四台发电机定子线圈运行情况分析,新线圈经过真空浸胶,防潮性能比旧线圈好。如在冬季枯水期中较长时间的停机,或在伏旱中停机半月或一月以上,线圈也不易受潮。旧线圈槽部是卷烘绝缘,端部有搭接层,既存在绝缘薄弱环节,端部又易吸潮。如1号机新线圈,1975年5月3日测得线圈温度 33℃ ,绝缘电阻及吸收比 $R_{60''}/R_{15''}=250/170=1.47$ 。用ZT1型介质测量仪,测得介质损耗 $\text{tg}\delta\%=8\%$ 。而3号机旧线圈,在1977年2月测得线圈温度 17℃ ,绝缘电阻及吸收比 $R_{60''}/R_{15''}=200/150=1.33$,用ZT1型仪器测得介质损耗为 $\text{tg}\delta\%=12\%$ 。说明线圈更换后,机组的绝缘电阻、吸收比有所提高,介质损耗有所下降。

新线圈十一年的运行实践说明,对进口该型机组设备进行线型和绝缘结构的改进,在发电机组的运行温度、出力和效率等方面,都能满足设计要求。在最有利的有效水头下,发电机出力可达1300至1400千瓦(本电站,由于运行水头达不到机组要求的设计水头,达不到1600千瓦的额定出力)。夏天,线圈温度一般在 $65-70\text{℃}$ 。

对新线圈运行中的绝缘监测及一年一度测介质损耗,采用QS型交流电桥测试。当线圈温度在 $15-20\text{℃}$ 时,绝缘电阻及吸收比 $R_{60''}/R_{15''}=200/150=1.33$, $\text{tg}\delta\%=7-10\%$ 。作2.5-3.0倍额定电压的直流耐压试验测得泄漏电流,一般在30-50微安。进行1.3倍额定电压的电流耐压试验时,电容电流为120-130毫安。

以上情况可供其它中小容量发电机的改进、检修、运行参考。