

# 1 150MW 核能发电机流量分配试验 若干问题分析

宋清松 陈涛 黄晓川

东方电气东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 以某核电站现场发电机定子绕组流量分配试验为题, 对流量分配试验过程中发现的一些问题进行逐一分析, 找出了影响流量分配准确性的因素, 提出了相应的解决方法。

**关键词:** 核能发电机; 定子; 流量分配

中图分类号: TM623.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2017)03-0055-06

## Cause Analysis of Problems in Flow Distribution Test of 1 150 MW Nuclear Power Generator

SONG Qingsong, CHEN Tao, HUANG Xiaochuan

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper introduces cause analyses of a series of problems found in the process of flow distribution test in a nuclear power plant, indicating the factors that have influences on the accuracy of flow distribution, and giving proposed solutions to sorting out the problems.

**Key words:** nuclear power generator; stator; flow distribution

流量测试仪有多普勒超声波流量计和时差式超声波流量计。多普勒法是利用超声波在传播路径上如遇到微小固体颗粒或气泡会被散射的特点工作的, 适合测量含有一定气泡数的流体介质, 可用于非满管测量, 但测量精度不高。时差法主要原理是当超声波束在液体中传播时, 液体的流动将使传播时间产生微小变化, 其传播时间的变化正比于液体的流速, 液体流动时, 逆流方向的声波传输时间大于顺流方向的声波传输时间, 适用于满管测量, 测量洁净液体时精神较高, 但在气泡数多时难以测准。

由于设计结构特点, 1 150 MW 核能发电机定

子绕组流量分配试验必须要在发电机穿转子前完成。新机安装时, GST 系统即“定子绕组冷却水系统”的二次冷却水来自外部 SRI 系统, 一般在发电机穿转子前 SRI 系统不具备启运条件。在不投运二次冷却水系统时, GST 定冷水自身循环将使水温逐步升高, 有可能超过温度限值, 因此不具备流量试验通常所要求的定冷水系统水循环 24~48 h 的要求, 若要准确地进行流量测试就要解决水温上升的问题。

### 1 流量试验过程

某核电站 4# 机由于某些因素, 要求制造厂到

收稿日期: 2017-04-20

**作者简介:** 宋清松(1980-), 男, 2003年毕业于沈阳工业大学电气工程及其自动化专业, 2014年获华中科技大学电机与电器专业硕士学位, 高级工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机的安装、调试技术服务工作。

陈涛(1980-), 男, 2002年毕业于华北水利水电大学水力水电动力工程专业, 工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机的安装、调试技术服务工作。

黄晓川(1988-), 男, 2010年毕业于四川大学热能与动力工程专业, 工程师。现在东方电机有限公司从事热能发电机的安装、调试技术服务工作。

现场进行流量试验，这也是东方电机首次到电站进行核电机组的流量分配试验。流量分配试验过程中发现出一些问题，以下为具体流量分配试验过程。

(1) 最初因 GST 系统循环将使水温上升，循环时间达不到 24 h，管道内可能含有较多气泡数，因此用多普勒流量计测试了 GST 系统总管，发现两个主要问题：①测得的发电机总进水管线 L730 总流量偏小，不符合设计要求，但进水压力却已达 0.23 MPa，与同型机组相比压力偏高。GST 系统 004DI 节流孔板尺寸为直径 57 mm，较之前 3 台机组的直径 55 mm 偏大。②定子出线流量中性点侧约 45 L/min，出线侧约 70 L/min，支路流量偏差较大。从此数据看需要调整节流孔板尺寸。

(2) 7 月 30 日，用超声波流量计进行测量，测量结果与用多普勒流量计测量结果的总体趋向是一致的，确认了需要调整节流孔板尺寸。

(3) 8 月 1 日~8 月 8 日，现场根据测试情况进行 GST 系统节流孔板(GST004DI、GST005DI 等)调整，调整后再测试，再调整。

在此期间将定子出线绝缘引水管的节流孔板进行了调整，发现出线绝缘引水管节流孔板(孔径 13 mm)装在中性点侧，而按要求应该是装在线性侧，调换过来。截止 8 日，GST004DI 调整为直径 55 mm，GST005DI(发电机出线回水管线 L715)调整为直径 25.11 mm。

(4) 8 月 9 日，与 GST 系统设计人员一同排查了整个 GST 系统。系统管道安装没有问题，离子交换器管道排查无堵塞，主水过滤器管线排查无堵塞，加热器旁路管线排查无堵塞，给出将 GST004DI 调小至直径 53 mm 的意见。

(5) 8 月 11 日，将 GST004DI 调小至直径 53 mm 后，再次进行流量测试时，发现 L730(DN150)管径设置有误，厂内模板中管外径数据 159 mm，但经 GST 系统设计人员确认实际管线经过法兰后有变径，应为 168 mm，壁厚均为 4.5 mm。更改管径数据设置后测试总管流量约在 180~200 t/h 间波动，测得总流量数据有所增大。但回水 002MD 流量变送器显示却仅有 160 t/h，差距较大，另外发现超声波流量计显示波动较前几次测试时更大，非常不稳定。定子出线部分总流量约 20 t/h，但  $V_1$  相较  $U_1$ 、 $W_1$  偏小， $U_1$  相为 3.22 t/h， $W_1$  为 3.12 t/h，

$V_1$  仅 2.92 t/h。进水压力仍然偏高，约 0.21 MPa。

(6) 8 月 13 日，校验 005LP 压力表，检查回水流量变送器 002MD 前节流孔板 012DI 安装方向，用内窥镜检查进、出水汇流母管内部有无堵塞。将  $V_1$  相绝缘引水管节流孔板由 13 mm 扩至 13.5 mm 处理。工程建设相关单位研讨后决定为了减小测量误差，采取向 GST 系统补水的措施来解决水温上升的问题，使水循环时间达到 24 h 要求。

(7) 8 月 14 日，005LP 校验完成；012DI 孔板检查安装方向无异常， $V_1$  相节流孔板扩孔处理至直径 13.5 mm 完成。定子进出汇流管检查，拆解定子进出口法兰，采用内窥镜检查汇流管内部，无异常。8 月 14 日下午 4 点过启动 GST 系统循环，晚上 6 点多时水温上升到 36℃ 以上，到晚上 8 点，水温上升到 40℃。水温上升到 45℃ 后，调试单位开始进行补水操作，到 8 月 15 日早上一共进行了 4 次补水操作。

(8) 8 月 15 日水循环时间达到 24 h 后查看 004 压力有所下降，不到 0.21 MPa，002 MD 反映的流量数据有所提高，约 180 t/h。下午 4 点开始进行流量试验，外部进、出水管流量测试数据基本吻合，外部管路测量完成时已到傍晚 6:00，水温上升至 46℃。再次开始补水操作，降低水温。晚上，进行定子出线部分及线棒支路流量试验测试，于 16 日凌晨完成测试。

从测量数据来看，外部管道(进出水)流量数据吻合，定子出线总流量 19.6 t/h， $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  相流量均匀，均约 3.01 t/h。定子线棒各支路流量均匀，偏差小于 20%，但支路流量相加总和约 122.5 t/h，这个数据与外部管道上测量的数据约 157 t/h 偏差较大，高达 34.5 t/h。具体数据见表 1、表 2 和表 3。

经工厂技术分析会讨论，对于外部管道流量数据和进水压力偏高都认可，在正常运行时高位水箱充 0.05 MPa 气压时进水压力也低于设计限值 0.27 MPa 的，不会影响 GST 系统正常运行。对于定子线棒支路汇总后与回水管道测量的流量数据偏差高达 34.5 t/h 的情况，认为有累积误差，但由于以前没有汇总过，具体误差值没有经验，不能确认。

技术分析会上反馈出核电绝缘引水管采购有 2 个厂家，2 个厂家管径壁厚数据不一样，而这

个情况并没有有效传递。1 150MW 核电流量试验报告模板中的数据还是原岭澳二期工程的绝缘引水管管径壁厚数据，但自岭澳二期工程后，采购的绝缘引水管即已更换厂家。将 2 个厂家的管径壁厚数据传到现场，在现场又实测了管外径，具体数据见表 4。因不能确认试验结果，并需要验

证管径壁厚对流量测试结果的影响究竟有多大，要求现场按正确的管径壁厚尺寸再次进行一次流量测试。

(9) 8 月 21 日，现场调试人员重新启动 GST 系统开始水循环，循环 24 h 后于 22 日再次进行流量测试，测试结果见表 1、表 2 和表 3。

表 1 GST 系统发电机入口压力及外部管道流量数据

功能位置	8 月 15 日	8 月 22 日	备注
发电机进口压力 004/MPa	0.288 ~ 0.295	0.289 ~ 0.301	水箱未充压
临时压力表/MPa	0.188 ~ 0.198	0.185 ~ 0.196	水箱未充压
011DL/(t·h <sup>-1</sup> )	10	8	离子交换器出口就地显示表
002MD/(t·h <sup>-1</sup> )	180.7 ~ 185		流量变送器显示值
L750 总回水/(t·h <sup>-1</sup> )	178	182	超声波测量值
L750 发电机出口流量/(t·h <sup>-1</sup> )	157	163	超声波测量值
L730 发电机进口流量/(t·h <sup>-1</sup> )	180	179.8	超声波测量值
004DI 前/(t·h <sup>-1</sup> )	182	181	超声波测量值
005DI/(t·h <sup>-1</sup> )	19.6	21.2	超声波测量值

表 2 8 月 15 日与 8 月 22 日线棒支路流量数据对比

记录时间 下层线棒	2014/8/15 流量 (L/min)	2014/8/22 流量 (L/min)	记录时间 下层线棒	2014/8/15 流量 (L/min)	2014/8/22 流量 (L/min)
101MT	20.94	20.77	201MT	22.00	22.04
102MT	20.33	21.56	202MT	21.66	22.27
103MT	21.32	21.37	203MT	20.90	22.31
104MT	20.17	21.70	204MT	20.72	22.34
105MT	20.80	20.72	205MT	21.33	22.62
106MT	21.00	23.32	206MT	21.25	21.83
107MT	20.53	22.70	207MT	20.42	21.03
108MT	21.03	21.69	208MT	19.48	21.33
109MT	22.58	22.36	209MT	20.38	21.51
110MT	20.77	21.82	210MT	21.29	20.62
111MT	20.05	22.80	211MT	22.66	22.64
112MT	22.20	22.89	212MT	20.11	22.53
113MT	21.94	21.09	213MT	21.76	21.44
114MT	21.66	20.94	214MT	21.94	22.95
115MT	20.19	22.71	215MT	22.62	22.83
116MT	20.30	24.57	216MT	21.66	22.31
117MT	19.30	22.50	217MT	20.83	22.91
118MT	21.65	24.10	218MT	20.76	21.91

119MT	22.72	21.26	219MT	23.04	23.70
120MT	20.08	21.50	220MT	21.25	22.40
121MT	22.09	23.54	221MT	20.53	24.33
122MT	23.09	22.03	222MT	23.45	22.66
123MT	20.20	23.43	223MT	20.98	22.37
124MT	22.40	22.61	224MT	19.20	21.29
125MT	20.72	21.85	225MT	20.52	20.52
126MT	20.15	21.22	226MT	20.91	21.89
127MT	19.98	23.11	227MT	20.71	23.12
128MT	22.00	21.93	228MT	19.33	22.04
129MT	21.74	22.49	229MT	20.29	22.31
130MT	18.96	21.47	230MT	21.40	24.52
131MT	21.20	21.88	231MT	19.45	23.16
132MT	21.54	20.56	232MT	20.61	21.71
133MT	23.75	21.65	233MT	19.86	21.77
134MT	22.42	22.64	234MT	21.56	22.09
135MT	24.34	22.71	235MT	21.97	21.35
136MT	21.75	22.45	236MT	21.55	21.85
137MT	22.06	21.60	237MT	21.49	23.01
138MT	19.60	22.38	238MT	22.60	23.08
139MT	22.95	23.40	239MT	22.58	22.87
140MT	22.57	23.20	240MT	21.24	22.85
141MT	23.50	21.44	241MT	21.57	23.42
142MT	21.56	24.82	242MT	20.08	23.52
143MT	20.33	24.67	243MT	22.74	22.95
144MT	21.66	24.84	244MT	21.83	23.46
145MT	21.59	22.89	245MT	20.41	22.82
146MT	21.71	21.94	246MT	21.49	23.33
147MT	20.61	21.36	247MT	21.95	22.48
148MT	20.62	22.82	248MT	20.83	21.12
平均值	21.35	22.36	平均值	21.19	22.40
最小值	18.96	20.56	最小值	19.20	20.52
最大值	24.34	24.84	最大值	23.45	24.52
最小偏差	11.18%	8.05%	最小偏差	9.40%	8.41%
最大偏差	14.02%	11.09%	最大偏差	10.66%	9.44%
		16日汇总		22日汇总	
L/min		2 041.84		2 148.71	
t/h		122.5104		128.9226	

表3 8月15日与8月22日定子出线部分流量数据对比

测量时间	2014/8/15		2014/8/22	
$U_1$	50.63 L/min	3.04 t/h	50 L/min	3 t/h
$V_1$	50 L/min	3 t/h	50.36 L/min	3.02 t/h
$W_1$	50.25 L/min	3.01 t/h	50.17 L/min	3.01 t/h
$U_2$	53.6 L/min	3.21 t/h	52.56 L/min	3.15 t/h
$V_2$	52.42 L/min	3.14 t/h	52.36 L/min	3.14 t/h
$W_2$	51.44 L/min	3.09 t/h	51.94 L/min	3.12 t/h
总计	308.34 L/min	18.50 t/h	307.39 L/min	18.44 t/h
外部管道 L715 测量定子出线汇流管				
L715	19.6 t/h		21.2 t/h	

表4 不同绝缘引水管厂家管径尺寸及现场实测尺寸

所属装配	绝缘引水管图号	内径/外径		
		施耐德	Resistoflex	现场实测外径/mm
1Q4704 汽端绝缘引水管装配	3Q8141 展开长 570	$d15 / d22$	$d15 / d24.28$	24.19
	3Q8142 展开长 736.5	$d15 / d22$	$d15 / d24.28$	(周长 76)
	3Q8143 展开长 593	$d19 / d27$	$d19 / d30.78$	30.87
	3Q8144 展开长 593	$d19 / d27$	$d19 / d30.78$	(周长 97)
	3Q8147 展开长 1 257	$d19 / d27$	$d19 / d30.78$	
1Q4705 汽端绝缘引水管装配	3Q8145 展开长 555	$d15 / d22$	$d15 / d24.28$	24.19
	3Q8146 展开长 721.5	$d15 / d22$	$d15 / d24.28$	(周长 76)
1Q4869 定子出线装配	3Q8729 展开长 1 232	$d30 / d40$	$d28 / d45.36$	44.56 (周长 140)
1Q4895 上半过渡引线装配	3Q8989 展开长 606	$d19 / d27$	$d19 / d30.78$	30.87 (周长 97)

22日测量结果，GST系统上除将进离子交换器的流量由15日的10 t/h调低至8 t/h外，未做任何其他调整。对比8月15日和22日2次测量的结果，22日更改超声波流量计管径壁厚尺寸设定，定子线棒绝缘引水管内径15 mm保持不变，壁厚由3.5 mm增大到4.64 mm。所测得的下层线棒单根支路流量平均值由21.35 L/min增大到22.36 L/min，上层线棒单根支路流量平均值由21.19 L/min增大到22.40 L/min，基本上都增大了约1 L/min多。但汇总后的总流量128.9 t/h与发电机出口管道测试的回水163 t/h偏差仍然很大，偏差为 $(163 - 128.9)/163 = 20.9\%$ 。定子出线绝缘引水管内径由30 mm减小为28 mm，管壁厚由5 mm增大到8.68 mm，所测得的流量数据基本保持不变。出线部分汇总流量18.44 t/h与GST管道上测得的流量21.2 t/h比较偏差达到 $(21.2 - 18.44)/21.2 = 13\%$ 。

## 2 试验过程发现的问题

从以上过程可见4#机现场流量试验存在的主要问题如下。

(1) 进水压力偏高，但排查GST系统无异常。

(2) 发电机绝缘引水管管径壁厚数据没有进行有效传递，导致试验人员所掌握的数据未及时更新。另外，GST系统上进水管(L730)外径，原流量试验报告模板上管径(外径)为159 mm，经GST系统设计人员确认L730往上经过法兰变径后，管径实际为168 mm。将超声波流量计中管径设置做相应更改后，测量的流量数据变大了。这样外部管道总进、出水数据基本上就能对应了。

(3) 定子出线绝缘引管的节流孔板按要求应装在线性侧，但操作人员却安装在了中性点侧，导致需重新进行调整。

(4) 没有细化判断标准,支路流量汇总后与总管上测得的流量数据偏差太大,没有掌握具体偏差的经验。

(5) 对于现场 GST 系统二次冷却水不具备投运条件的,没有相关经验措施来控制水循环时温度升高的问题。

(6) 对于水循环引起水温升高的温度限值,以前也没有确定具体数值。

### 3 问题解决及后续改进

#### 3.1 关于发电机进口压力

GST 系统中提到发电机进水压力高限值 0.27 MPa(期望值 0.24 MPa),虽然此台机组从试验开始发现进水压力较前 3 台机组偏高,但经排查 GST 系统及定子汇流管检查,未发现异常,到最终流量试验结果确认压力为:

$(0.289 \sim 0.301) \text{ MPa} - 0.1 \text{ MPa} (\text{大气压}) + 0.05 \text{ MPa} (\text{运行时高位水箱充压}) = 0.239 \sim 0.251 \text{ MPa} (\text{正常运行时进水压力})$ 。

这个压力值未超过系统设计限值 0.27 MPa,不会影响 GST 系统正常运行,不影响水泵的正常切换。

#### 3.2 管径、壁厚

此次发现原流量试验报告模板中管径壁厚数据在厂内未及时有效传递更新,为避免后续再出现同样问题,组织更新流量试验报告模板,并增加相应的必要数据,另外,在现场流量测试前,可以实测一下管外径,复核确认好管道管径,壁厚数据。

#### 3.3 水循环时间

正常流量试验都是按至少保证 24 h 的循环时间,最好达到 48 h,越长的循环时间,定冷水中气泡含量越少,对于超声波流量测试准确度越高。根据此次现场流量试验所取得的经验,后续核电项目流量试验时,在 GST 系统二次冷却水 SRI 系统不具备投运条件时,可以采取补水的方式来降低水循环导致温度升高的问题,具体自 L741 SED F08 E4 补水,由 GST036VD(L820)或 GST007VD 排水,监视高位水箱液位,保持前后液位一致。若二次冷却水具备投运条件,则直接由二次冷却水降温。

#### 3.4 水温升高限值

此前没有文件说明流量试验时定冷水温度限值,早期调试单位自行试验时,按水温升高不超

过 50℃ 执行。这是依据正常运行时进水温度限值而确定的,但实际上水温升高限值应主要受限于 GST 系统上的树脂在温度过高时将失效的因素。查证树脂说明书后,确认树脂失效温度为 60℃,因此可以确认将水温高限值设在 60℃,因此建议达到 55℃ 左右时进行补水操作,以免补水不及时造成温度超过 60℃ 而使树脂失效。

#### 3.5 出线部分绝缘引水管节流孔板

一定注意是安装在线性侧  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  相,中性点侧不安装,按经验一般安装 13 mm 孔径就能满足流量分配要求。此次 4<sup>#</sup> 机最初发现线性侧与中性点侧流量偏差很大,线性侧流量较中性点侧大许多,经检查发现是装反了。现场更正后,流量基本均匀, $V_1$  相稍偏小,随后又将  $V_1$  相节流孔板直径由 13 mm 扩孔至 13.5 mm,问题解决。

#### 3.6 L730 进水管流量的测试

若在节流孔板 004DI 前端(发电机顶)测量,由于离节流孔板太近,测量不准,因此应在中间层找平直的管段测量,减小测量误差。8 月 15 日在靠近 004DI 前端(发电机顶)测量数据为 196 t/h,但在中间层测量为 182 t/h,与节流孔板后端测量 180 t/h 吻合。

#### 3.7 支路汇总后与总管流量数据偏差

从此次试验数据来看,无论定子线棒还是定子出线,支路流量汇总数据与总管上测试的流量数据偏差都较大,特别是线棒支路汇总后与总管流量偏差达  $(163 - 128.9)/163 = 20.9\%$ ,偏差量达  $163 - 128.9 = 34.1 \text{ t/h}$ 。除测量误差累积因素外,是否有其他因素,建议在厂内流量试验时,可以测一下总管路流量,多收集数据,多做这方面的验证,以掌握此偏差值的经验值。

### 4 结语

此次现场流量试验耗时近 1 个月,发现需理清的问题较多,反映出对于首次在电站现场进行的 1150 MW 核电机组现场流量试验预估不足,由于现场流量试验涉及到 GST 系统调整等,现场试验条件与厂内试验条件(状态)相比有诸多不同。通过此次试验,将发现的问题逐一整改落实后,更新了流量试验报告模板,并增加相应的必要内容和要求,形成较完整的核电现场流量分配试验方案,其中部分经验也可供常规电厂的流量试验参考。