

# 水轮发电机定子绕组温度测量方法的现场应用

江建明, 马 辉, 濮峻嵩, 曹 军, 刘 曦

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

**摘 要:**以一台水轮发电机定子绕组温度的测量为例,介绍了发电机定子绕组温度测量方法,主要介绍了定子绕组端部外表面、定子绕组汇流排、定子绕组铜线温度直接测量方法和工艺以及注意事项。

**关键词:**定子绕组;热电偶;绝缘温降;温度测量方法

**Abstract:** This paper takes a temperature testing of a hydro generator stator winding as an example to introduce the generator stator winding temperature testing method. The main contents are method about direct temperature testing in copper winding and technique and suffice of stator winding ending and stator confluence bars.

**Key words:** stator winding; thermocouple; temperature drop of insulation; temperature testing method

**中图分类号:** TM306 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)04-0079-05

发电机运行时,本身要消耗一部分能量。这部分能量包括机械损耗、铁芯损耗、铜损耗和附加损耗。这些损耗转换成热能,使电机各部分的温度升高。发电机采用冷却系统将热量带走,使各部分的温度不超过相应的允许温度。必须通过温升试验,实测电机各部分的温度。发电机的温度测量方法有用电阻法测量绕组的平均温度,用检温计测量定子绕组和铁芯的温度,直接测量定子绕组铜温,在发电机定子铁芯端部埋设热电偶测量温度。直接测量发电机定子绕组的铜导体温度,可以免除绝缘温降的影响,使测量的温度更加准确,还可以了解发电机绕组内部的温度分布情况。下面介绍了一台水轮发电机定子绕组端部外表面、定子绕组汇流排、定子绕组铜线温度现场实测情况。

该发电机型号 SF150-96/15600,额定功率 150 MW,额定容量 171.4 MVA,额定定子电压 13.8 kV,额定定子电流 7172 A,额定功率因数 0.875,额定频率 50 Hz,额定转速 62.5 r/min,定 转子绝缘等级 F/F,接线方式 Y。

## 1 试验方法

### 1.1 定子绕组端部外表面温度测量

定子绕组绝缘端部外表面温度采用临时埋设的铜-康铜热电偶测温元件进行测量。测温元件埋设部位应在电机定子线圈中性点部位,可选择发电机上、下端部相对应的位置。上、下端部各埋设 2 个测

温点,三相三支上下端部共 36 点。测温元件穿黄蜡管或玻璃丝管引出,引线应固定牢固。

### 1.2 发电机定子绕组汇流排温度测量

定子线圈中性点汇流排部位应能耐受 1.5 倍额定相电压。

定子绕组汇流排温度采用临时埋设的铜-康铜热电偶测温元件进行测量。测温元件埋设部位在电机定子线圈中性点汇流排部位。每相每分支各埋设 3 个测温点,三相三支共埋设 27 个测温点。测温元件穿黄蜡管或玻璃丝管引出,引线应固定牢固。

### 1.3 线棒铜线温度分布测量

#### 1.3.1 制作测铜温线棒的方法

直接测量定子绕组铜导体的温度,是一项细致的工作。测量前,在制作新线棒时,在铜导体上,预埋设测温元件后再包扎绝缘,制成直接测量铜温的线棒。测温元件采用热电偶,其引线可沿着铜导体从两端接头处引出。

#### 1.3.2 注意事项

(1)为了防止线棒在制造过程中(如整形、浸胶等),或在运行中因温度较高使测温元件的引线短接,在线棒绝缘内部,测温元件的引线要穿玻璃丝管或其他的耐热材料后再引至接头处。

(2)从接头到机壳外的引线要有足够的电气绝缘强度。在电机机壳内,在端部要将引线牢固地固定在绝缘支架上。

(3)对于氢冷电机,还要将测温元件的引出线在机壳处加以密封。

### 1.3.3 选择测温线棒和埋设位置

(1) 选择测温线棒: 在运行中电机的上下层线棒承受的电磁振动、散热条件是不同的。一般是上层线棒比下层的股线损耗大, 电磁振动大, 散热条件差, 致使上层线棒的铜温比下层线棒高。所以在制作测温线棒时, 应选择上层线棒。

(2) 选择埋设位置: 为了使测温线棒处于低电位, 测量时不危及人员和设备的安全, 测温线棒应埋设在电机的中性点附近。

需要说明的是, 除上述一般的考虑原则外, 对于测温点的具体布置, 可根据电机的特点、冷却系统的结构及分析电机可能出现最高温度的部位, 沿线棒轴向长度和端部有代表性的部位, 并在线棒的上下窄面和宽面上埋设测温元件。

### 1.3.4 测温线棒的制作工艺

在制作测温线棒时测温元件埋设在定子线棒铜线股间。测温元件为铜—康铜热电偶, 铜  $\Phi 0.20$ , 康铜  $\Phi 0.19$ 。外包耐 500 V 和 350℃ 聚四氟乙烯, 因为一个线棒电位差仅 45 V, 温度最高不可能超过 350℃, 所以选用的测温元件在温度及电压方面都能满足试验和以后机组安全运行要求。另外, 为了安全, 测温元件引出线需外套耐高温、高压的硅胶管。用该种热电偶进行了定子线棒带电温升分布试验后, 在试验线棒端部对测量引线进行了剪断及绝缘处理, 机组可带试验线棒长期安全运行。由于发电机在发生一点接地时, 中性点电压要升高至相电压, 并考虑到发电机大修预防性试验时, 测温元件对地要承受 1.5 倍额定线电压的交流耐压, 因此测温元件对地应能耐受 1.5 倍发电机额定线电压。

### 1.3.5 测温元件的引出及试验要求

由于这是一次现场试验, 而且各测量元件都带一定的电位, 测量过程将是带电操作, 所以测温元件的选择、埋设、固定、引出与测量都需作出必要的绝缘方面的考虑与处理。

将测温元件从机壳引至机外, 同一线棒的测温元件穿黄腊管集束后, 再穿对地耐压水平为 1.5 倍发电机额定相电压的绝缘管, 在发电机内绑扎牢固, 径向引出至发电机机壳外的多点巡回检测仪。所有固定测量引线的地方都要经过绝缘处理。

线棒测温系带电操作, 因此要严格按带电作业规程进行。巡回检测仪应放置在绝缘台上, 绝缘台耐压水平为 1.5 倍发电机额定相电压。设置试验人员工作用的绝缘

平台, 绝缘平台用 10 mm 厚绝缘板, 上垫 5 mm 厚胶皮, 胶皮放试验桌上, 桌上垫 3 mm 胶皮, 测量人员带绝缘手套, 穿绝缘鞋, 绝缘平台周围分布警戒标志。

由于机组带引线长期运行不确定因素太多, 试验应在开机后 72 h 运行前进行。因为各线棒均处于不同相、不同支路中, 所以测温应按照等电位原则: 一个线棒一个线棒地进行测量。测试温度时, 应按高压试验要求, 由两人进行测量, 其中一人负责测量, 一人负责记录和监护。

本次试验作 6 根试验线棒, 共 90 个测温点。考虑到上层线棒相链的漏磁通比下层多, 股线集肤效应大, 附加损耗大, 上层线棒温度普遍比下层线棒相同部位的温度高。因此, 本次试验在上层布置 5 根线棒, 下层布置 1 根线棒。具体埋设位置见表 1。1 号、2 号线棒为 A 相, 3 号、5 号线棒为 B 相, 4 号、6 号线棒为 C 相。具体埋置位置如下:

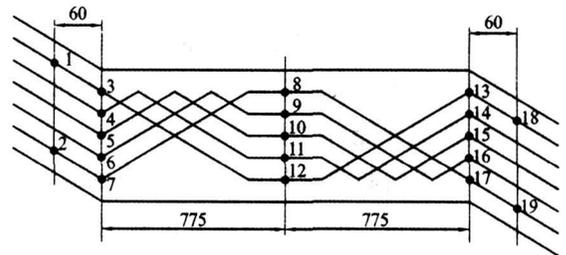


图 1 1 号线棒内热电偶布置图

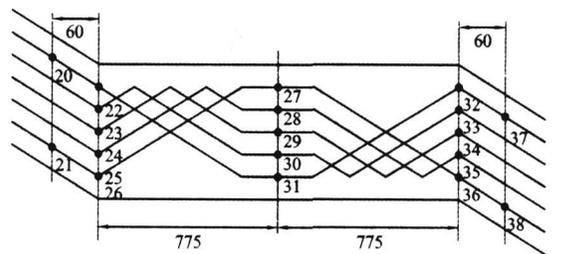


图 2 2 号线棒内热电偶布置图

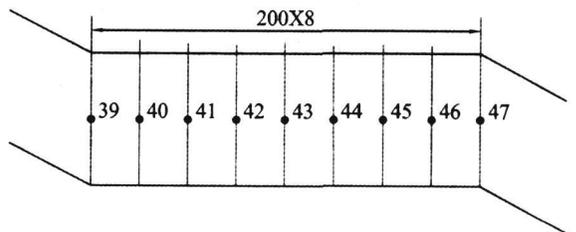


图 3 3 号线棒内热电偶布置图

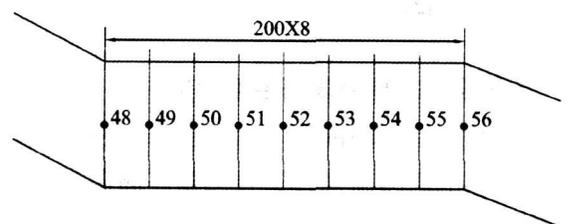


图 4 4 号线棒内热电偶布置图

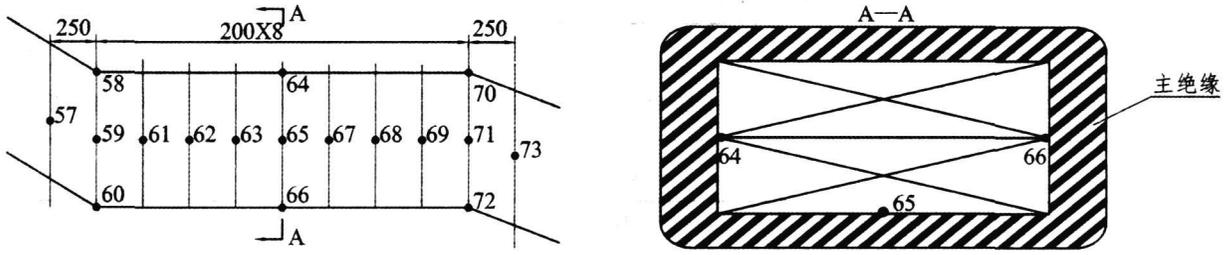


图 5 5号线棒内热电偶布置图

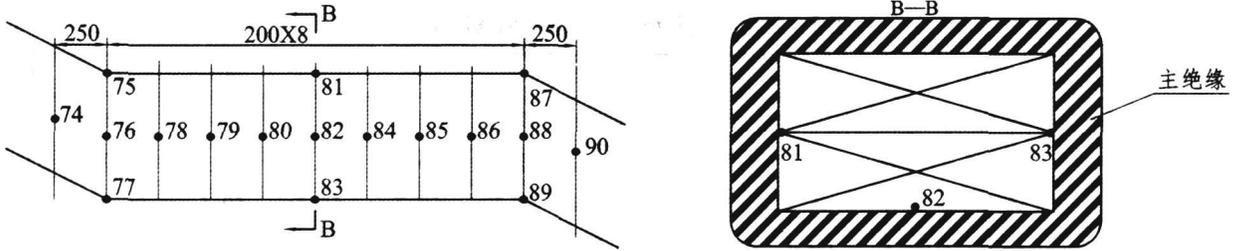


图 6 6号线棒内热电偶布置图

表 1 试验线棒埋设位置

线棒编号	槽号	层别	电位 (V)
1	264	上	450
2	231	下	135
3	220	上	450
4	坏	/	/
5	240	上	90
6	286	上	450

## 2 试验结果

发电机汇流排测温点布置如表 2 所示,其温度测量结果如表 3 所示;发电机定子绕组端部表面温度测温点布置如表 4 所示,其温度测量结果如表 5 所示,发电机定子绕组铜线温度测量结果如表 6 所示。

表 2 发电机汇流排测温点

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
汇流排相序	V <sub>31</sub>	V <sub>32</sub>	V <sub>33</sub>	W <sub>31</sub>	W <sub>32</sub>	W <sub>33</sub>	U <sub>11</sub>	U <sub>12</sub>	U <sub>13</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>12</sub>	V <sub>13</sub>	U <sub>31</sub>	U <sub>32</sub>
编号	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	/
汇流排相序	U <sub>33</sub>	W <sub>21</sub>	W <sub>22</sub>	W <sub>23</sub>	W <sub>11</sub>	W <sub>12</sub>	W <sub>13</sub>	U <sub>21</sub>	U <sub>22</sub>	U <sub>23</sub>	V <sub>21</sub>	V <sub>22</sub>	V <sub>23</sub>	/

注: 汇流排测点号中 U、V、W 为相别,第一个脚标表示分支,第二个脚标表示每分支的三个测点号(按从左到右顺序编排)。

表 3 发电机汇流排温度测量结果

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
60% P <sub>N</sub>	54.0	50.0	52.8	53.0	52.6	52.0	54.4	53.5	55.2	52.9	54.4	54.5	51.3
75% P <sub>N</sub>	61.3	56.5	59.5	60.8	59.7	59.2	62.4	61.2	63.8	60.2	62.7	63.1	57.8
90% P <sub>N</sub>	67.1	60.0	64.4	66.3	64.4	63.9	68.7	67.3	71.3	66.2	69.3	69.6	62.2
100% P <sub>N</sub>	72.9	64.3	69.9	71.6	70.1	68.7	74.8	73.3	77.5	72.2	75.3	75.3	67.6

续表 3

测点	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
60% P <sub>N</sub>	52.1	/	51.0	48.6	50.4	52.2	53.2	54.1	54.9	55.0	54.9	54.9	55.3
75% P <sub>N</sub>	58.2	/	58.0	53.7	56.4	58.4	61.7	61.8	62.0	63.7	63.8	63.5	62.9
90% P <sub>N</sub>	62.1	/	62	58.6	60.5	64.6	68.1	67.1	69.4	70.5	71.7	70.8	69.0
100% P <sub>N</sub>	67.9	/	66.7	59.6	64.8	69.9	73.1	72.9	75.2	76.8	76.5	77.0	75.1

注: 27号测点已坏,在表中未列出。表中 P<sub>N</sub> 为发电机额定负荷。

表 4 发电机定子绕组端部表面测温点

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	214上端	215上端	231上端	247上端	253上端	259上端	269上端	275上端	287上端	291上端	293上端	303上端

续表 4

编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	/
槽号	309上端	319上端	325上端	335上端	341上端	357上端	335下端	341下端	357下端	325下端	309下端	/

表 5 发电机定子绕组端部表面温度测量结果

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
60% P <sub>N</sub>	50	49.9	51.6	50.1	51.7	51.5	51.7	51.5	49.5	51.6	49.8	50.7
75% P <sub>N</sub>	55.8	54.8	57.8	55	57.3	57.3	57.5	56.8	54.5	57.5	54.7	57.3
90% P <sub>N</sub>	57.3	55.5	59.8	55.7	58.9	58.8	59.1	58.7	55.3	59.5	56.8	59.3
100% P <sub>N</sub>	61.5	59.6	64.7	60.3	63.6	63.7	64.1	63.4	59.3	64.4	63.6	64.2
测点	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	/
60% P <sub>N</sub>	51.6	51.5	51.2	51.3	51.1	52.9	52.2	49.8	49.7	53.2	54.0	/
75% P <sub>N</sub>	57.6	56.7	56.9	56.6	57.9	59.4	58.4	54.5	59.0	60.7	61.1	/
90% P <sub>N</sub>	59.8	58.7	58.5	58.5	60	61.6	60.6	54.6	60.9	63.1	64.2	/
100% P <sub>N</sub>	64.6	63.2	63.1	63.1	64.9	66.7	65.2	58.5	66.0	68.4	69.5	/

表 6 发电机定子绕组铜线温度测量结果

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60% P <sub>N</sub>	67.4	62.0	69.1	70.0	62.7	/	67.8	66.9	67.0	66.8
75% P <sub>N</sub>	77.8	72.0	78.7	80.3	72.7	/	78.1	78.8	78.6	77.9
90% P <sub>N</sub>	86.6	81.1	86.8	89.6	81.8	/	87.2	87.6	88.7	88.0
100% P <sub>N</sub>	93.8	88.0	93.8	97.0	89.4	/	95.2	96.0	96.7	95.3

续表 6

测点	11	12	13	14	15	16	17	18	无号	20
60% P <sub>N</sub>	63.0	62.7	62.2	70.7	68.0	67.0	65.0	66.3	62.3	63.0
75% P <sub>N</sub>	73.2	72.8	73.8	80.9	78.3	77.5	75.0	75.8	72.3	75.2
90% P <sub>N</sub>	82.7	82.2	83.3	90.1	87.5	87.3	84.2	83.6	80.3	84.8
100% P <sub>N</sub>	90.8	89.9	90.9	97.6	95.1	94.9	91.5	90.3	88.0	93.6

续表 6

测点	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
60% P <sub>N</sub>	65.1	63.1	64.5	61.2	62.0	/	/	57.8	61.8	61.3
75% P <sub>N</sub>	76.6	73.5	75.2	73.6	75.4	/	/	66.7	70.8	70.3
90% P <sub>N</sub>	86.2	81.7	84.7	82.8	84.7	/	/	73.3	77.2	76.5
100% P <sub>N</sub>	94.8	89.9	93.1	92.0	92.1	/	/	79.6	84.2	83.2

续表 6

测点	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
60% P <sub>N</sub>	60.8	60.5	60.9	61.8	/	58.9	59.4	62.2	66.5	67.3
75% P <sub>N</sub>	69.4	69.7	70.3	71.7	/	70.7	69.2	/	76.6	77.5
90% P <sub>N</sub>	75.4	77.2	77.9	79.8	/	78.2	78.5	/	85.3	86.3
100% P <sub>N</sub>	81.9	84.8	85.2	87.5	/	86.3	87.0	/	93.2	94.2

续表 6

测点	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
60% P <sub>N</sub>	67.8	68.4	67.6	67.4	67.1	67.8	66.3	—	—	—
75% P <sub>N</sub>	78.1	79.8	78.7	78.8	77.7	78.5	77.3	—	—	—
90% P <sub>N</sub>	86.4	90.5	88.4	88.2	87.2	87.0	86.0	—	—	—
100% P <sub>N</sub>	93.7	97.8	96.4	96.2	95.2	94.7	93.1	—	—	—

续表 6

测点	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
60% P <sub>N</sub>	—	—	—	—	—	—	/	/	68.0	—
75% P <sub>N</sub>	—	—	—	—	—	—	/	/	80.8	—
90% P <sub>N</sub>	—	—	—	—	—	—	/	/	90.3	—
100% P <sub>N</sub>	—	—	—	—	—	—	/	/	98.4	—

续表 6

测点	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
60% P <sub>N</sub>	67.0	66.7	61.9	65.8	76.6	66.5	66.5	67.3	63.2	64.8
75% P <sub>N</sub>	79.5	77.9	71.6	76.5	77.6	77.0	77.3	78.1	72.9	74.0
90% P <sub>N</sub>	88.2	87.1	79.7	85.5	86.5	85.0	85.6	86.8	81.3	80.5
100% P <sub>N</sub>	97.3	95.2	87.2	93.5	94.6	92.5	93.8	94.5	89.4	88.2

续表 6

测点	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
60% P <sub>N</sub>	70.5	61.5	66	69.2	—	70.5	69.7	70.1	68.8	67.7
75% P <sub>N</sub>	81.2	71.3	72.6	80.3	—	83.0	81.4	82.2	81.0	78.8
90% P <sub>N</sub>	90.1	78.7	80.4	90.7	—	92.9	91.1	92.8	90.7	88.1
100% P <sub>N</sub>	97.6	86.4	88.3	99.4	—	100.9	98.9	101.1	98.5	96.3

续表 6

测点	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
60% P <sub>N</sub>	66.4	66.4	66.4	67.6	68.0	68.3	80.5	—	66.5	66.6
75% P <sub>N</sub>	77.3	77.2	77.1	78.3	78.8	78.9	82.0	—	76.9	77.1
90% P <sub>N</sub>	86.6	86.0	85.4	87.6	88.1	87.5	89.4	—	85.6	86.3
100% P <sub>N</sub>	94.0	93.6	92.3	94.8	96.2	95.8	96.6	—	93.4	94.2

注:表中“—”表示测温元件在发电机定子绕组嵌线中已损坏。

## 4 结语

本文介绍了发电机定子绕组温度测量方法,主要介绍了定子绕组端部外表面、定子绕组汇流排、定子绕组铜线温度直接测量方法和工艺以及注意事项,由于以上几种测温均属带电测温,特别应注意安全,应按带电作业的要求进行。以上测温方法在现场应用较少,对于掌握发电机运行中的温度情况具有较为重要的意义,可供电厂和电机制造厂借鉴。

## 参考文献

[1] 李建明,朱康,等.高压电气设备试验方法[M].中国电力出版社.

### 作者简介:

江建明(1966—),男,高级工程师,长期从事发电机试验研究。

马辉(1973—),女,高级工程师,长期从事发电机试验研究。

濮峻嵩(1973—),男,工程师,从事发电机试验研究。

曹军(1958—),男,高级工,长期从事高压试验。

刘曦(1982—),女,助理工程师,从事高压试验研究。

(收稿日期:2008-02-27)