

应用电容图技术检测发电机定子漏水问题

郭永红¹,孙士涛²,梅志刚²

(1.北京京能电力股份有限公司石景山热电厂,北京 100042;
2.国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司),北京 100045)

摘 要:概述了发电机定子漏水问题的主要检测手段、产生的原因和造成的危害,介绍了电容图技术的基本原理和研究现状,介绍了应用电容图技术对石景山热电厂 2 号发电机进行现场测试的情况,并以该数据为依据评估了该电厂 2 号发电机的漏水情况,最后总结了电容图技术的优点和局限性,对其应用前景进行了展望。
关键词:发电机;定子线棒漏水;电容图
中图分类号:TM311 **文献标识码:**B **DOI:**10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2016.01.010

Application of Capacitance Map Technology to Detect Generator Stator Coolant Water Leaks

Guo Yonghong¹,Sun Shitao²,Mei Zhigang²

(1. Beijing Jingneng Power Co. Ltd. Shijingshan Thermal Power Plant, Beijing 100042, China;
2. State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd. Research Institute, North China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: This paper outlines the main detecting methods, causes and the consequence results of generator stator coolant water leaks, and the principles and research status of the capacitance map technology are introduced briefly. The capacitance map of No. 2 generator stator bars of Shijingshan Power Plant is given by an on-site test. Based on these data it is evaluated how serious stator coolant water leaks of No. 2 generator are. The advantages and limitations of capacitance map technology are concluded and its application prospects are discussed.
Key words: generator, stator bar's coolant water leaks, capacitance map

0 引言

定子线棒漏水是水内冷发电机经常出现的问题^[1-6],是威胁机组安全运行的常见故障之一。发电机运行中的严重漏液事故可以通过冷却介质中气体含量(内冷水箱中的含氢量)的报警、发电机机内的液位报警、发电机补水率增加以及氢气湿度的迅速增加等现象及时发现。如果怀疑定子存在漏水问题时,可以在检修过程中通过压力衰减试验或者真空衰减试验^[7]、气体检漏法^[8]以及定子端部手包绝缘的表面电位和泄漏电流测量^[9]等试验手段加以判别。其中,压力衰减试验对于微小的漏点检测不够灵敏,同时易受环境温度和大气压力的影响,而且此方法会使泄漏故障方向上的残留水向绝缘中移动,从而使绝缘损伤扩大化。真空衰减试验虽然具有较高

的灵敏度,但需要较长时间的准备工作来抽真空,而且由于水蒸汽的产生会导致真空的衰减造成误判,有时可能要进行多次试验来确定。气体检漏法用于漏点定位,成本较高,定位时间长,工作量大。定子端部手包绝缘的表面电位和泄漏电流测量方法是一种检测水电接头漏水状况的常规试验手段,但对于微小漏点的检测仍不够灵敏。寻求一种更加灵敏和更加简便的定子线棒微渗漏检测手段十分必要。

电容图技术是一种新颖的检测方法,能够在水电接头微渗漏的潮气迁移到出槽口可能造成对地短路故障之前及时定位漏水线棒,方便用户在威胁来临之前及时制定检修策略。

1 定子线棒漏水的原因和危害

大型汽轮发电机的定子绕组一般都采用叠

式绕组,每匝线圈都是由两个单匝杆式条形线棒连接组成。水内冷单匝线棒一般采用多股互相绝缘的实心 and 空心股线并联而成,空心股线内通冷却水带走热量。单匝杆式条形线棒的直线部分采用换位结构^[10],以抑制集肤效应。为了缩短端部线圈长度并简化制造工艺,单匝线棒的端部一般被压成渐开线形状,渐开线部分以及渐开线与直线部分和线棒水电接头部分的连接处总共有4种不同半径的R型弯曲。如果空心导线存在质量问题,上述这些股线的弯折工艺可能会留下制造隐患,长期运行的电磁力、冷热应力和內冷水的化学侵蚀会导致空心导线上出现裂纹,从而导致漏水问题的发生。

两根水内冷单匝线棒在鼻端焊接成一个整线圈。线鼻处既是电的接头,又是水的接头,如果水电接头^[11]焊接不良,长期水质不合格可能会造成对不良焊接部位的侵蚀,引起称为“焊缝腐蚀”的过程^[12],引发漏水问题。此外,由于聚四氟乙烯绝缘引水管的质量不良、安装工艺不规范以及绕组端部振动引起的水管磨损也会导致绝缘引水管漏水。

另外,相当数量的运行机组存在微渗漏现象。所谓微渗漏是指线棒已发生漏水,但并未造成绝缘明显下降的渗漏现象。空心导线的细微裂缝、水电接头的焊接不良或者运行中的焊缝腐蚀是引起微渗漏的主要原因。微渗漏现象一般先发生在水电接头部位,由于潮气的持续侵蚀,主绝缘的环氧云母包带层会分层和膨胀,水分会通过绝缘的分层或者铜股线间的空隙,沿着线棒端部向出槽口迁移。

严重的漏水问题会破坏定子水路,造成主绝缘电气强度急剧下降,轻则使机组停运,重则引起发电机短路事故,甚至烧毁发电机。而对于定子的微渗漏,虽然不会立即造成机组的停运,但是也会造成以下几点危害:第一,微渗漏造成主绝缘吸水饱和,使主绝缘绝缘的电气强度下降。第二,潮气持续侵蚀使主绝缘产生分层现象,当绝缘分层从水电接头的铜焊连接部位发展到槽部时,高电位的线棒上会发生局部放电。第三,微渗漏会降低绝缘的机械强度,受到故障冲击时,主绝缘就更容易被撕裂。

2 电容图技术的原理与研究现状

2.1 电容图技术的原理

将定子线棒的局部电容等效为一平板电容,

则其电容量的表达式为:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (1)$$

式中, ε 是线棒绝缘材料的介电常数, A 是平板电容的等效截面面积, d 是平板电容的等效厚度。

根据式(1),绕组或线棒的局部电容量主要有4个影响因素:

(1)绕组绝缘劣化或分层将使主绝缘中气体含量增加,绝缘平均介电常数减小,其电容量会减小。

(2)绕组绝缘受潮之后,水含量的增加,使主绝缘的平均介电常数增大,其电容量增大。

(3)定子绕组端部脏污时,定子铁心的地电位会沿绕组端部某些部位向外延伸。这实际上等效于增大了平板电容的表面积,因而,绕组脏污也会增大其电容量。

(4)绕组电压升高到一定程度,绝缘中的气泡放电短接,等效减小了平板电容的厚度;线棒表面防晕涂层使电场更加均匀,等效增大了平板电容的表面积,均使电容量变大。

假设定子所有线棒的同一局部劣化情况基本相同,在清洁绕组之后,并且在不发生局部放电的相同电压下测量线棒出槽口或者水电接头的局部电容量,那么此电容量主要由主绝缘中含水量的大小来决定。因此可以通过测量所有线棒同一部位的局部电容量,绘制出电容图,也就是局部电容量与线棒所在槽号的关系,然后通过一定的统计分析方法评估定子线棒的局部电容量分布情况,找出漏水线棒,这就是电容图技术。

2.2 电容图技术的统计分析方法

如果将测得各线棒的局部电容量作为一组统计样本,那么需要通过一定的统计分析方法对其分布特征进行分析,常用的分析方法主要有以下两种。

2.2.1 基于正态分布的统计分析方法

设连续型随机变量 X 的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad -\infty < x < +\infty \quad (2)$$

则称 X 服从参数为均值为 μ ,标准偏差为 σ 的正态分布或高斯分布。正态分布存在以下规则:

$$P\{\mu - 3\sigma < X \leq \mu + 3\sigma\} = 99.74\% \quad (3)$$

这就是说,对于正态随机变量 X ,它的值落在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 区间内几乎是肯定的事。这就

是所谓的“ 3σ 规则”。

对于测得的一组线棒局部电容试验数据 X_1, X_2, \dots, X_j , 认为它是一个服从正态分布的随机变量, 则给出其概率密度函数的参数 μ, σ 的估计值为:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^2} \quad (5)$$

如果第 j 号线棒的局部电容量超出了 $\mu + 3\sigma$, 那么就可以认为第 j 号线棒出现了漏水现象。

2.2.2 基于四分位差的统计分析方法

将一组样本数据由小到大(或由大到小)排序后, 用 3 个点将全部样本数据分为 4 等份, 与这 3 个点位置上相对应的样本数据称为四分位数, 分别记为 Q_1 (第 1 四分位数)、 Q_2 (第 2 四分位数, 即中位数)、 Q_3 (第 3 四分位数)。其中, Q_3 与 Q_1 之差又称为四分位差 IQR (Inter-Quartile Range), 记为 Q_d 。四分位差越小, 说明中间部分的数据越集中; 四分位数越大, 则意味着中间部分的数据越分散。

假设电容图测得的样本数为 72, 测得的数据按由小到大的顺序分别为 X_1, X_2, \dots, X_{72} , 那么第 1 分位点和第 3 分位点分别为 18 和 54, 则 $Q_1 = X_{18}, Q_3 = X_{54}, Q_d = X_{54} - X_{18}$, 当某根线棒的局部电容量大于 $Q_3 + 1.5Q_d$ 时, 则认为该线棒存在泄漏点。

3 电容图技术的研究现状

电容图技术最早由 Bureau of Reclamation Denver Office 提出^[13], GE 公司、日本东芝公司和韩国电科院曾先后进行过研究, 并研制出相关设备^[14-15]。这些设备并没有商业化, 市场上未见供应商提供这些设备。目前在国内未见相关内容的报道。

在电容图技术中, 局部加压的电极传感器是电容测量是否准确的关键因素。Bureau of Reclamation Denver Office 和 GE 公司采用最简单的金属片或金属箔作为电极。为了保证测试条件的一致性, 韩国电科院的电极采用柔性导电涂料制作电极, 采用弹簧保证压力在测试时为一个定值。东芝公司则采用气动装置保证压力为定值, 减小了人为因素对测试的影响。这两种电极都采用了屏蔽措施以减少杂散电容的影响。

在测量仪器方面, 文献[13]提出了 4 种电容测试仪器, 其中两种是精密电容计, 两种是精密变频测量电桥, 其中一种电桥甚至能在低至 0.1 Hz 的频率下测量电容量。文献[13]还指出湿线棒与干线棒电容量之比随着频率的降低而增大, 在 0.1 Hz 达到最大。GE 公司采用电容计进行测试, 韩国电科院和日本东芝公司则研制了专用的电容测试仪器。这些仪器可能采用西林电桥或变压器比例电桥的原理。

在分析试验数据时, 除了 Bureau of Reclamation Denver Office 之外, 上述其他单位提出的微渗漏线棒的判断标准都是根据介损或电容量的单一数据统计的特征值如均值、标准偏差、四分位差等来给出。Bureau of Reclamation Denver Office 则用介损和电容量之和大于某个限制值来给出微渗漏的判据。

4 电容图技术的现场应用

本文采用 AI6000E 数字式抗干扰介损测量仪对石景山热电厂(下称石热)的 2 号发电机进行了电容图的现场测试, 分别对水电接头和出槽口的电容图进行了绘制。对于水电接头局部电容量的测试, 利用定子绕组端部手包绝缘的表面相对地电位测量试验(电位外移试验)装设的铝箔作为电极; 对于出槽口局部电容量的测试, 本文使用导电铜箔围绕出槽口包裹一周作为电极, 如图 1 和图 2 所示。测试时, 发电机通水, 水电导率为 $0.89 \mu\text{S}/\text{cm}$, AI6000E 采用正接线方式, 在绕组上加压 1 kV, 试验电压频率为 65 Hz。

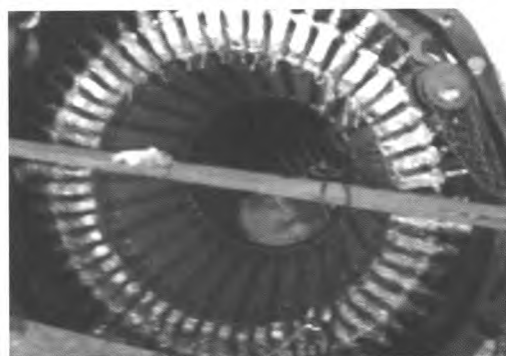


图 1 水电接头局部电容测量

相应的局部电容量测试数据见表 1~4, 根据测试数据绘制水电接头和出槽口的励侧和汽侧电容图如图 3~6 所示, 图中的红色实线为 $\mu + 3\sigma$ 所在的限制线, 绿色虚线为 $Q_3 + 1.5Q_d$ 所在的限

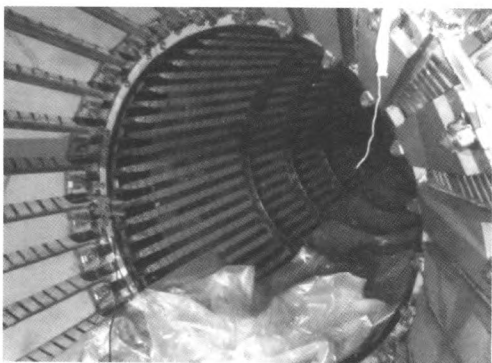


图2 线棒出槽口局部电容测量

制线。对于水电接头,从基于正态分布的统计分析方法来看,励侧和汽侧未发现超出标准的线棒;从四分位差的统计分析方法来看,励侧有 5 根线棒超出了 $Q_3 + 1.5Q_d$ 的限制值,这 5 根线棒的编号分别是 2 号、12 号、13 号、52 号和 53 号。如果排除铝箔包裹松紧度不同的影响,那么这 5 根线棒的励侧水电接头可能已发生渗漏。对于出槽口,按照上述两种统计分析方法,未发现超出标准的线棒,也就是说,所有线棒的出槽口都没有微渗漏导致潮气沿绝缘层迁移的迹象。

表 1 石热 2 号发电机汽侧水电接头电容图数据

编号	C/pF	编号	C/pF	编号	C/pF
1	146.7	19	143.5	37	117.4
2	166.6	20	105.1	38	139.0
3	119.5	21	119.6	39	127.0
4	140.9	22	108.0	40	115.8
5	142.9	23	122.4	41	122.8
6	123.0	24	127.8	42	148.9
7	131.5	25	134.4	43	129.5
8	131.6	26	133.6	44	132.1
9	124.7	27	112.3	45	108.8
10	95.4	28	111.8	46	116.1
11	112.3	29	144.5	47	110.9
12	121.6	30	149.7	48	132.4
13	126.5	31	156.3	49	112.2
14	113.6	32	122.3	50	137.4
15	132.8	33	144.9	51	143.3
16	142.5	34	126.6	52	174.1
17	144.2	35	112.9	53	118.3
18	125.8	36	112.9	54	137.0

注: $\mu = 128.43, \sigma = 15.39, \mu + 3\sigma = 174.60, Q_1 = 115.95, Q_3 = 139.95, Q_d = 24, Q_3 + 1.5Q_d = 175.95$

表 2 石热 2 号发电机励侧水电接头电容图数据

编号	C/pF	编号	C/pF	编号	C/pF
1	136.2	19	96.6	37	117.6
2	163.0	20	123.2	38	146.4
3	129.0	21	115.6	39	123.7
4	155.4	22	136.4	40	138.9
5	131.6	23	143.4	41	138.4
6	131.6	24	105.8	42	125.5
7	146.0	25	116.0	43	153.7
8	153.4	26	130.2	44	125.1
9	134.0	27	137.3	45	132.1
10	101.2	28	111.8	46	119.8
11	102.9	29	136.3	47	122.4
12	181.1	30	135.4	48	125.8
13	181.5	31	132.2	49	136.2
14	159.7	32	128.4	50	158.8
15	127.5	33	129.1	51	127.5
16	134.6	34	108.2	52	180.9
17	136.6	35	100.2	53	164.5
18	132.0	36	131.0	54	154.7

注: $\mu = 134.15, \sigma = 19.39, \mu + 3\sigma = 192.31, Q_1 = 123.45, Q_3 = 138.65, Q_d = 15.20, Q_3 + 1.5Q_d = 161.45$

表 3 石热 2 号发电机汽侧出槽口电容图数据

编号	C/pF	编号	C/pF	编号	C/pF
1	27.81	19	28.39	37	24.41
2	31.07	20	27.28	38	17.88
3	32.96	21	32.71	39	27.30
4	34.94	22	21.92	40	26.08
5	26.95	23	28.71	41	32.38
6	29.83	24	26.66	42	20.74
7	34.11	25	27.10	43	33.33
8	28.70	26	21.07	44	19.56
9	30.39	27	22.35	45	25.56
10	29.82	28	14.65	46	27.91
11	20.18	29	27.40	47	20.12
12	34.73	30	24.63	48	24.18
13	31.62	31	29.09	49	29.50
14	35.86	32	20.19	50	29.72
15	38.19	33	21.50	51	36.31
16	26.36	34	17.78	52	30.00
17	23.29	35	24.73	53	23.12
18	28.46	36	18.86	54	26.16

注: $\mu = 26.94, \sigma = 5.27, \mu + 3\sigma = 42.74, Q_1 = 22.74, Q_3 = 29.92, Q_d = 7.18, Q_3 + 1.5Q_d = 40.69$

表 4 石热 2 号发电机励侧出槽口电容图数据

编号	C/pF	编号	C/pF	编号	C/pF
1	32.60	19	15.27	37	28.57
2	36.85	20	19.41	38	35.70
3	30.00	21	19.55	39	35.32
4	32.14	22	26.39	40	31.97
5	34.30	23	32.25	41	37.02
6	20.10	24	15.92	42	26.52
7	30.08	25	19.95	43	22.75
8	25.56	26	20.43	44	23.83
9	28.56	27	22.80	45	16.80
10	38.20	28	30.33	46	24.02
11	28.73	29	18.86	47	22.83
12	24.22	30	28.31	48	31.80
13	28.07	31	28.45	49	24.81
14	29.68	32	32.34	50	40.61
15	24.35	33	27.16	51	26.56
16	13.04	34	39.79	52	26.52
17	19.47	35	19.36	53	18.70
18	34.80	36	34.38	54	35.89

注： $\mu = 27.26, \sigma = 6.71, \mu + 3\sigma = 47.38, Q_1 = 21.59, Q_3 = 32.06, Q_d = 10.47, Q_3 + 1.5Q_d = 47.75$

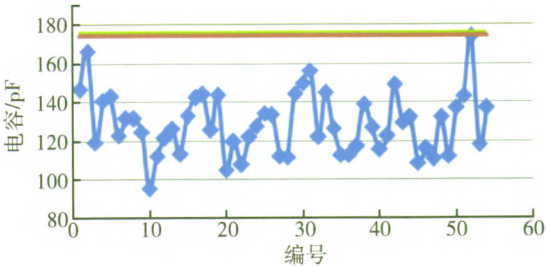


图 3 石热 2 号发电机汽侧水电接头电容图

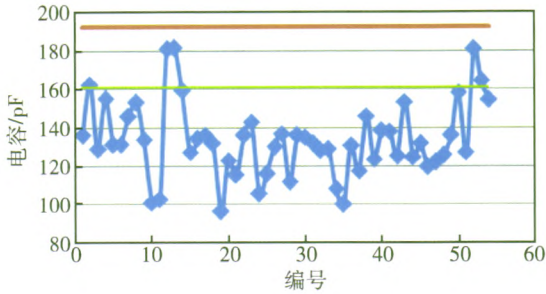


图 4 石热 2 号发电机励侧水电接头电容图

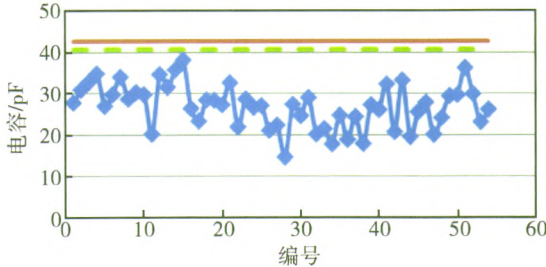


图 5 石热 2 号发电机汽侧出槽口电容图

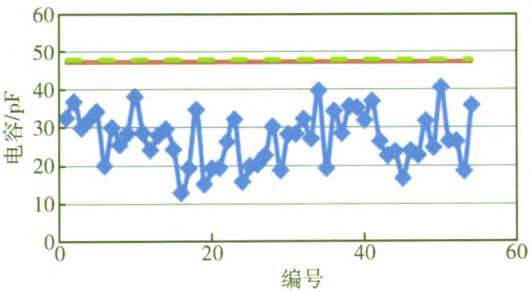


图 6 石热 2 号发电机励侧出槽口电容图

5 结论

本文概述了发电机定子线棒漏水问题产生的原因、造成的危害以及主要的检测手段,介绍了电容图技术的基本原理和研究现状,并对石热 2 号发电机进行了电容图测绘。试验数据表明,电容图技术用于检测水电接头的微渗漏,可以在缺陷引入的湿气沿绝缘层迁移到线棒出槽口造成击穿事故之前,有效定位缺陷所在的线棒。电容图测绘不会导致漏水问题的扩大化,且对微渗漏检测具有较高的灵敏度。局部电容量的测量本质上是对微电流的测量,这限制了电容图技术的大范围推广和应用。研制具有较强测试稳定性的加压屏蔽电极以及较高精度的微电流测量仪器是突破这一限制的关键因素。

参考文献

[1]李伟清. 汽轮发电机故障检查分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社,2010:93,24.
[2]王玉炯,刘熹. 600 MW 氢冷发电机定子线圈漏点查找及处理[J]. 华电技术,2013,35(4).
[3]秦海平,张军,薛金辉,等. 发电机定子漏水原因分析及处理[J]. 山西电力,2006(6).
[4]郑明海. 发电机定子漏水故障分析及处理[J]. 水利电力机械,2007,29(11).
[5]葛忠续,崔明. 220 MW 发电机定子线棒漏水原因分析及处理[J]. 热电技术,2013(2).
[6]周怀理. 发电机定子线棒漏水和断股的原因分析[J]. 大电机技术,1999(2).
[7]Joseph A Worden. 关建军(译). 对水内冷发电机定子绕组泄漏的认识、诊断和维修[J]. 国外大电机,2006(3): 1-11.
[8]廖生明. 利用气体检漏法查找发电机定子水系统内部漏氢[J]. 热力发电,2006(2):59-60.
[9]冯复生,王国富. 汽轮发电机端部线圈电位外移测量法及标准的探讨[J]. 华北电力技术,1993(6).

(下转第 70 页)

更清吹模式转速区间后,1号燃气轮发电机组清吹模式下的发电机励端、汽端轴承振动均大大减小,最大振动值为发电机励端X向轴振81.4 μm,出现在清吹模式下首个转速波峰11.3 Hz时。由此可以得出结论,更改清吹转速区间后,1号燃气轮发电机组的轴承振动值,满足机组运行安全的要求。

4 结论

燃气轮发电机组冷拖试验是一个综合了电气、热工、机务多个专业的调试任务,且冷拖的动力设备SFC装置基本为进口设备,因国外厂家的技术保密,冷拖试验的现场调试常困难重重。针对国内某电厂SGT5-4000F燃气轮发电机组冷拖试验的调试工作,就该燃气轮发电机组冷拖试验的调试内容和步骤,以及调试过程中遇到的问题,进行了较为仔细的研究和论述。

(1)简要介绍了燃气轮发电机组冷拖试验的动力设备,SFC装置及其原理;并详细论述了燃气轮发电机组冷拖试验3种模式的目的和内容,即水洗模式、清吹模式和直启模式。

(2)对国内某电厂SGT5-4000F燃气轮发电机组冷拖试验的调试过程进行了较为详细的描述,包括冷拖试验调试的准备工作,冷拖试验TCS画面的操作运行,以及冷拖试验3种模式的调试结果。

(3)介绍了该项冷拖试验1号燃气轮发电机

组调试工作中遇到的问题,即发电机励端轴承在原清吹模式设计转速区间内,存在过临界现象。并同时论述了该问题的解决办法,即变更清吹模式的转速区间,规避发电机的临界转速,从而保证机组的运行安全。

参考文献

[1]杨顺虎. 燃气-蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2003:193-194.
[2]上海电气. SGT5-4000F 燃气轮机盘车装置运行维护手册[R]. 上海:上海电气电站设备有限公司,2013.
[3]任彦. 北京西北热电中心京能燃气热电项目“二拖一”机组燃气轮机 SFC 调试技术交底[R]. 北京:华北电力科学研究院有限责任公司,2014.
[4]刘凯,赵炎,张弛. 燃气轮发电机组 SFC 系统调试[J]. 华北电力技术,2013(7):44-45.
[5]张鑫. 浅谈燃机 SFC 系统[J]. 科技资讯,2010,8(4):113.
[6]刘明行,蔡迈,王磊. 燃气轮机组 SFC 变频装置原理及应用探究[J]. 华东电力,2010,38(11):1763-1766.
[7]张俊峰. 燃气轮机组中静态频率变换器的原理和应用[J]. 广东电力,2008,21(12):51-55.
[8]刘明行,赵玉,项立铮. 燃气轮机发电机组静止变频启动装置研究[J]. 能源研究与信息,2006,22(2):98-102.
收稿日期:2014-07-02
作者简介:任彦(1986—),男,工程师,现主要从事发电厂生产服务及基建调试工作。

(本文编辑 卢晓华)

(上接第 63 页)

[10]涂光瑜. 汽轮发电机及其电气设备[M]. 北京:中国电力出版社,2007:20-25.
[11]张道纲,曹广恩,朱松建. 大功率汽轮发电机及其运行[M]. 北京:水利电力出版社,1986:38.
[12](美)斯通(Stone G C).《旋转电机的绝缘——设计评估老化试验修理》编译组(编译). 旋转电机的绝缘——设计评估老化试验修理[M]. 北京:中国电力出版社,2010:145-147.
[13]Arbour R C, Milano B. Diagnosing high-potential test failures in large water-cooled hydro-generators[C]//Proceedings of IEEE Electric/Electronics Insulation Conference Chi-

cago, IL, September 1989:228-235.
[14]Inoue Y, Hasegawa H, Sekito S, et al. Technology for detecting wet bars in water-cooled stator windings of turbine generators[C]//IEEE IEMDC,2003:1337-1343.
[15]Hee Soo Kim, Yong Chae Bae, Chang Dookee, et al. Wet bar detection by using water absorption detector[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008 (22): 1163-1173.
收稿日期:2015-03-04
作者简介:郭永红(1970—),女,高级工程师,主要从事 200 MW 火力发电厂电气设备技术管理工作。

(本文编辑 卢晓华)