

电机部分

大型汽轮发电机故障模式分析及对策

Analysis on Failure Modalities and Strategies for Large Capacity Turbogenerators

沈梁伟

(哈尔滨大电机研究所)

Shen Liangwei

(Harbin Institute of Large Electrical Machinery)

摘要 本文结合国内外发电机运行实践和经验,将发电机本体的主要故障分类,从分析故障模式着手,找出故障的异常现象、可能原因及对策,以提高发电机运行的可靠性。

关键词 汽轮发电机 故障模式分析

Abstract Combined with wide operation experience, the failure modalities for large capacity turbogenerator are analysed in this paper. Along the line of this, the failure phenomenon, the possible reasons and strategies can be found out. It will result in raising operation reliability.

Keywords turbogenerator analysis on failure modalities

1 前言

“七五”、“八五”期间,随着我国国民经济高速增长,我国电力工业发展很快,总装机容量和发电量已占世界第二位。

据电力部可靠性中心统计,自 1993 年 1997 年国产 200MW 机组的等效可用率(EAF)由 84.45% 提高到 88.71%;300MW 机组由 76.47% 提高到 86.86%。近年来,大型发电机的典型故障还屡有发生。发电机是机、电密度很高的产品,一旦出现问题,定转子烧毁的几率高,造成的停电损失比较大。

本文将主要的故障分类,从分析故障模式着手,找出故障的异常现象、可能原因及对策,以加深对提高发电机运行可靠性的认识和用于实践的自觉性。

在确定故障模式后才能找出对策。根据国内外的统计经验,属设计制造质量问题的约占 1/2,属安装和运行的各占 1/4。属设计制造问题的,应力争将问题解决在出厂之前。制造与使用双方应携手协作,将有效措施制定在相应的标准里,另外,故障模式分析也是状态维修的基础。

2 定子绕组故障模式分析

按 CIGRE(国际大电网会议)推荐,将事故原因分

为机械与电气两类,指出异常现象、可能原因及对策,检查有无相应标准和可能的监测手段。在我国投运的国产 300MW 发电机中,定子绕组的故障率据统计占 40% 左右^[1]。表 1 为定子绕组故障模式分析。故障形成的首发原因不同,故障发展的机理也不同,但若不及时处理均会造成定子烧损的严重事故,由于国内发电机在线监测比较薄弱,一旦定子烧毁,对事故的首发点与原因的分析,将造成相当大的困难。由表 1 可见,定子绕组故障情况比较复杂,必须抓住表中所列的异常现象逐步深入,根据不同情况,采取不同的、有针对性的措施才能见效。据不完全统计自 1982 年至今,200MW 及以上的大型汽轮发电机由于定子绕组故障最后发展成定子端部绕组短路事故的多达 40 起以上,这个问题必须引起高度重视。

2.1 关于绕组水路堵塞

国内从 100~600MW 发电机几乎都发生过定子绕组水路堵塞现象。仅 1994、1995 两年,由于这类事故导致定子烧损的有潍坊电厂 2# QFSN-300-2 发电机、汉川 1# QFQS-300-2 发电机、阳逻 1# QFSN-300-2 发电机、大坝 1# QFS-300-2 发电机等。由于造成堵塞的原因不同,因此有针对性的反事故技术措施也不相同。

(1) 70 年代朝阳 QFS-200-2 发电机,先后两次分别因定子水路法兰橡皮垫龟裂和定子水接头铜垫圈

表 1 定子绕组故障模式分析

异常现象	可能原因	对 策	相应标准 (见附录 2)	在线监测 (见附录 1)
机	过 热	· 保持水电导率 0.51.5 % μ S/cm	GB/ T 7064	SCW
		· 防止异物进入水路,进行流通性试验,水流量 $\pm 10\%$	JB/ T 6228	
		· 槽内检温计 ≥ 90 ,槽内检温计温差 ≥ 8 时, 降负荷,停机反冲洗	GB/ T 7064	GCM
	电接头焊接质量差	对银焊或锡焊接头进行检查 检查每支路冷态直流电阻偏差小于 1.5 %	锡焊标准,银焊标准 GB/ T 7064	GCM
械	疲劳断线,断股	· 注意线棒胶化质量 · 避开共振频率(94 ~ 115Hz)	GB/ T 7064	RFM
	水箱内含氢 渗漏水(定子水内冷)	· 空心导线逐根探伤	见工厂标准	PDM
		· 定子线棒电容测量	待定	
		· 进行密封性检测(气密 24h, $\Delta P \leq 0.2 P_N$)	JB/ T 6228	
		· 冷热循环试验	待定	
电	高电位处放电	· 定子水箱内含氢量监测(3 %注意,20 %停机)	GB/ T 7064	HL M
		· 进行局部泄漏电流试验 20kV: 相间 $\leq 10\mu A$,普通 $\leq 16\mu A$	见手包绝缘试验标准 安生技术[1994]86 号	PDM
	机内氢气湿度大	降温措施 机内 $A \leq 4g/m^3$ 保温措施 停进机内温度 ≥ 20	GB/ T 7064	HDM
	铁心松、绝缘磨损	· 可再紧固铁心结构 防止端部压指压偏	待开发	PDM
气	绝缘损坏	· 测端部振动模态和固有频率,要避开 · 94 ~ 115Hz 区域,不能有椭圆振型 · 注意有否磨损,及时处理	模态测试和固有振频 测试标准	SEVM PDM
	异物	电蛀虫效应	· 清洁度的保持 · 直流耐压检查	JB/ T 6204

进入定子水路引起堵塞。哈尔滨电机有限责任公司(HEC)在定子水路法兰连接处已不用橡皮垫,对定子水接头(球面头)提高加工精度,取消铜垫圈,靠直接挤压接触密封。

(2)70 年代末、80 年代初,QFS - 125 - 2 发电机曾发生过定子铜线氧化积垢堵塞水路。总结经验后,在国标 GB7064 中规定了对定子绕组应采用独立的密闭循环水系统并通过旁路离子树脂水处理,使水的导电率保持为 0.51.5 μ S/cm,至此解决了因水质问题引起的 CuO₂ 积垢堵塞。

(3)因异物进入定子水路而引起的堵塞。潍坊 2

发电机是在出厂水压试验时,误将水压试验用的橡皮塞,遗留在 45 号槽上层线棒和 8 号槽下层线棒励端进水三通内而造成堵塞。

渭河 4 # 发电机 1995 年 1 月运行中 GCM 报警,汽机侧一根线棒流胶冒烟,检查后发现过滤网有薄片异物,系水路堵塞所致。

HEC 第一台引进优化型 600MW 发电机(哈三 3 # 机)在厂内总装试验时发现,引线引出线焊接处(图 1)内残留石棉泥而将水路堵塞。这种事故可以通过厂内热水流试验发现。热水流试验可按 JB/ T6228 - 92“汽发绕组内部水系统检验方法及限值”进行。热

水流试验本来是确定产生气堵现象时的水压,但在出厂时,对检查整个定子水路有无堵塞非常有效。图2水流正常,图3有水堵现象,非常直观。上述600MW发电机堵塞就是在厂内热水流试验时确诊的。先通热水循环,在出水端绝缘引水管上贴热电偶测温,然后快速开启冷水泵冷却。

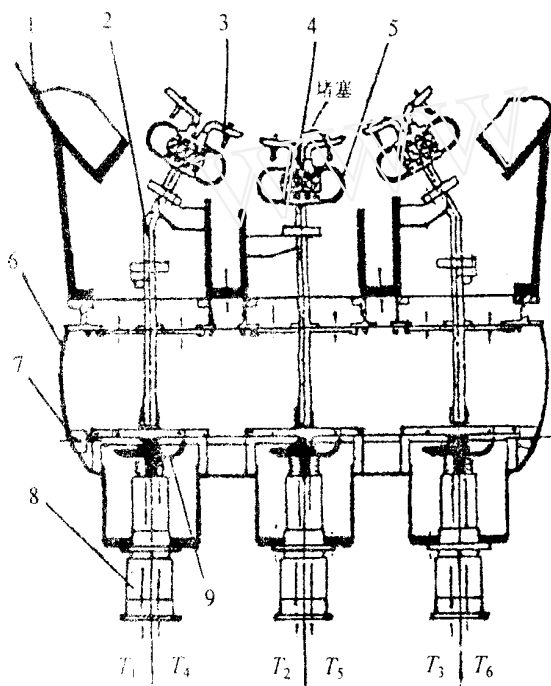


图1 哈三#600MW出厂试验堵塞处

1. 机座 2. 引出线 3. 定子引出线铜排 4. 软连接装配 5. 绝缘引水管
6. 出线盒 7. 引出线汇流管 8. 瓷盒端子 9. 绝缘引水管

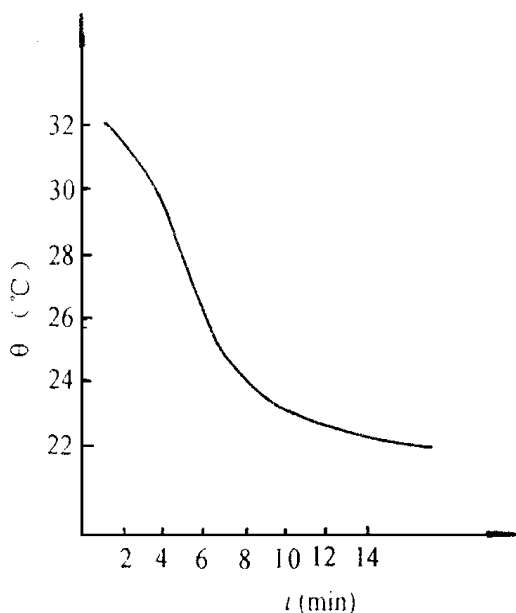


图2 水流正常

JB/T6228中规定了定子水路用水流量试验检查水路的流通性。该方法要打开绝缘引水管,通过用量杯计时测量每根线棒的流量,使水接头易损坏。另外容易将定子绕组弄潮。近来开发的超声波流量计在整机水路闭路循环下,测试汽、励两端每根线棒的水流量,无论从测量的准确性和减少工作量来看都值得推广。

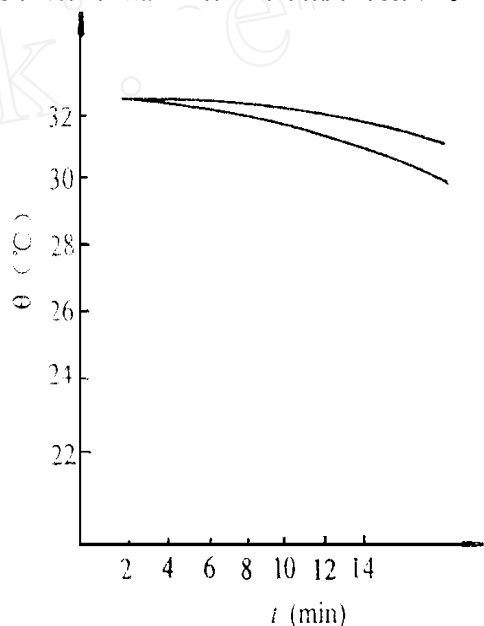


图3 有水堵现象

(4)关于定子水路堵塞引起的破坏机理,除堵塞→过热→绝缘烧损→短路外,还有堵塞→过热→线棒变形→短路。1994年8月13日,潍坊电厂2#发电机水路堵塞,当满负荷运行时,在出槽口拐弯处引起绝缘开裂,造成线棒接地。1995年6月9日,阳逻电厂1#300MW发电机,因定子空心导线进入橡皮圈而堵塞,当时负荷为300MW,定子第28槽的电阻检温计指示136,漏氢量增加很快,R处线棒变形很大,而且主绝缘与空心、实心铜线均已断裂烧损,见图4,R处受堵,热胀与停机后冷缩,线棒位移来回至少变

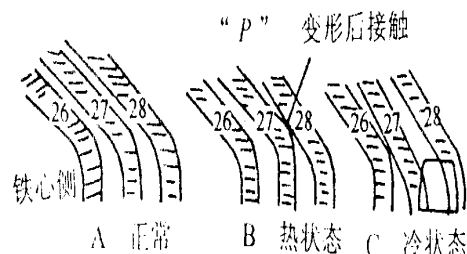


图4 线圈受热变形示意图

形 20mm 以上,引起主绝缘与铜线开裂。

(5) 采取了上述相关措施后,防止由堵塞发展到烧损最后的关键措施是严格执行 GB 7064 标准规定,即当出水端同层温差达 8 (定子氢内冷指出风温差 8),应采取措施降负荷,温差达 12 或槽内检温计超过 90 时应立即停机。由于从堵塞到烧损需要相当长时间,运行中槽内检温计又在计算机上定时打印,因此,只要及时监视,完全可以避免烧损。三门峡 300MW、平圩 1 # 600MW、华鲁 4 # 300MW、沙角 A 厂 300MW 的经验完全证明了这一点。

由水泵或水箱液面波动引起断水,而在 30s 内备用水泵又投不上时,发电机就要跳闸进行保护,这与水路堵塞处理方法是完全不同的。

2.2 关于漏水问题

绕组渗漏水分为静态与动态两类,常见的静态漏水的部位和原因是清楚的,即定子水接头把合密封不严、焊接处焊缝质量不好、定子空心铜线材质有缺陷、定子绝缘引水管交叉处在运行中磨破等等。定子铜导线疲劳断裂后漏水,或当转子水冷时,因转子引水线(俗称拐脚)疲劳断裂而漏水称动态漏水。值得指出的是,在氢、水冷却发电机中,氢压高于水压、定子水箱中含氢量增加,是漏水的信号。1997 年 2 月,西部电厂 1 # 定子水箱含氢量超过 20 %而被迫停机就是一例,检查发现在下部引线装配处有泄漏。

由于制造工艺有一定的分散性,因此对水路密封性进行检查很重要。我国传统上均将打水压作为检查水路严密性的主要手段,实际上水压对考验静态强度比较合适,由于它的灵敏度不够,不能作为检查严密性的主要手段,应执行 JB/T 6228—92 标准中气密试验(包括正负压)以代替传统水压试验。如 1995 年 HEC 为青山电厂制造的 300MW 发电机在厂内做定子出厂水压试验时,按标准 1MPa、8h 一次通过,甚至 1.2MPa、8h 也毫无问题,但是在压力为额定氢压 P_N 的气密试验时,发现泄漏大,通不过。原因是定子空心铜线晶粒粗大,质量有问题。另外,制造厂内不做水压试验,定子不通水,可避免运输时线棒积水冻裂。其次,应认识到动态应力也影响着密封。德国 SSW 早在 CIGRE 1982 年会议上,谈到了每根定子线棒进行冷热循环试验的重要性。

如今,对 HEC 正在生产的二滩 500MW 水冷水轮发电机,外方坚持要做冷热循环检查。汽轮发电机的定子线棒比水轮发电机长得多,由热胀冷缩引起的热

交变应力也更为严重,为此,IEC TC2/ SC2J 正在制定定子线棒冷热循环试验标准,以确保绝缘质量和密封质量。

根据 CIGRE 的报道,由于钎焊料磷银铜中的磷在长时间与水接触后会溶解在水中可造成微泄漏,因此,需要更灵敏的现场检漏方法,为此,开发了定子线棒局部电容测试法。该方法利用微渗漏后绝缘电容变化十分灵敏的特点而检测,许多公司已把它列为水冷电机大修的必检项目,我们也要开始这方面的工作。

按灵敏度区分,若水箱内含氢量增加,意味着严重漏水,用气密试验法可以检查出微小裂纹(中漏或微漏),用局部电容测试法可以检查出微量渗漏。水箱内含氢量超标,就意味着严重漏水,若继续运行,是很危险的,必须及时停机找漏予以处理。

2.3 金属异物

如哈三 1 # 200MW 发电机 1989 年短路,在渐伸线部位有金属异物:经检查有长 115mm 锯条嵌在 23 下层与 18 层上层两线棒之间。又如大亚湾 1 # 900MW 发电机 1995 年发现定子压板下有金属颗粒钻透了主绝缘和空心铜线造成大量漏氢而被迫停机检修。

若金属异物进入气隙,则后果往往更为严重,会击伤铝槽楔和定子铁心引起转子匝间短路、定子铁心短路,1998 年 5 月,青山 300MW 发电机大修时曾发现过这种情况。因此在制造、检修中,必须十分注意机内清洁度。

2.4 振动大

破坏模式是结构上有弱点 → 高振动值 → 磨损、液体接头泄漏或铜线疲劳断裂 → 短路。

结构上有弱点指的是:定子绕组固定不良,端部接头中填充物不满或固化不好,端部鼻端固有振频接近共振频率等。

其实,上述因定子绕组振动而产生的故障,长期以来在国产 100MW 及以上的发电机中屡有发生。以山东电力集团为例,1997 年底,装机容量为 12195MW,自 1993 年 1 月 ~ 1998 年 6 月,从 125-300MW 4 种型号的发电机,共发生过 6 起定子绕组端部松动故障^[2]。

国内双水内冷发电机曾多次发生压板螺杆松动、螺帽掉入机壳底部,绝缘垫磨损脱落等。经测试,发电机端部鼻端和引线的自振频率接近 100Hz。例如:1993 年 11 月 ~ 1994 年 11 月,渭河电厂 4 # 300MW

发电机,三次发生端部空心导线断裂漏水,3#300MW发电机,也因空心导线断裂喷水而三相短路。

1997年10月,渭河电厂5#优化型氢水冷300MW发电机汽机端磨损严重,而励端却完好。试验证明励端绕组自振频率合格,而汽端模态分析证明有共振迹象。HEC在厂里对另外几台300MW机实测后,发现也有相似现象。

在这方面,国外机组也出了不少的问题,如1994年11月、1995年2月,石横6#QFN-300-2发电机(美WH技术)运行6年及经过两次大修后,在运行中定子线棒鼻端发生相间短路。专家组现场进行了事故分析及讨论,认为是由于定子线棒鼻端固定不良和整体性差、运行中振动大、长期运行后上下层线棒端部鼻端铜线疲劳断裂,加上对该机型特点不熟悉、监控不及时所致。据美国EPRI 1967~1976年100MW及以上发电机统计,定子绕组共发生过54次故障,确认由铜导线疲劳断裂引起的为11起,占20.4%,前苏联也报道过200MW发电机共发生过35次断股故障。CIGRE在1986年11-03论文中也报道了澳大利亚某电站4台500MW发电机(英国造),因端部鼻端整体性差引起电连接疲劳断裂的相似事故。1997年10月2日,沙角电厂2#660MW发电机(GA造)C相出线环形导线约有1000mm烧熔,其原因也是由引线固定不良、振动过大而引起导线断裂拉弧烧损。

从原理上讲, $A \propto \frac{F}{\frac{f}{100} R}$
由

式中 A — 振幅

F — 电动力

R — 结构的阻尼约束

f — 固有振动频率

虽然形式比较简单,但实际上很复杂,这正是设计的难点和尚未掌握之处。

电动力 F 由定子线棒中电流和该处磁场作用而产生,沿渐伸线分布而且随时间变化,二极机激振力是100周。要控制振幅关键是改变结构阻尼 R 和将 f 避开激振频率 $\pm 10\%$,由于热态测得的 f 比冷态要下降5Hz左右,因此冷态 f 应避开94~115Hz,而且振型应避开椭圆型。定子绕组端部由压板、绑扎、支架、线圈、压环等零件组成,刚度都不相同,是一个非匀质系统。这个系统如果组合牢固,最后就会有等效的 R 和整体与各阶振型相对应的 f (图5、6)。如何改变结构和材料, R 和 f 都应选择适当,使 A 在极限值以下。

对这样的动力学问题,我们研究得还远远不够。关于 A 的极限值虽然应随结构而异,但许多公司都取125μm为新机合格值(额定状态),如果 $A > 250\mu\text{m}$ 应降低负荷, $A > 500\mu\text{m}$ 应立即报警。由于大量的绝缘件会受热收缩,往往运行后定子绕组振动值会随时间变化到一定时候才能稳定,因此,对新机型要装配在线测振装置SEVM,以掌握它的振动特性。SEVM以光纤居多,它的抗干扰性能较好,国内虽然开发了SEVM,但属试用阶段。

值得一提的是,在CIGRE SC11 93-1号调查中,几乎所有国家都指出,对大机组必须要有重新紧固

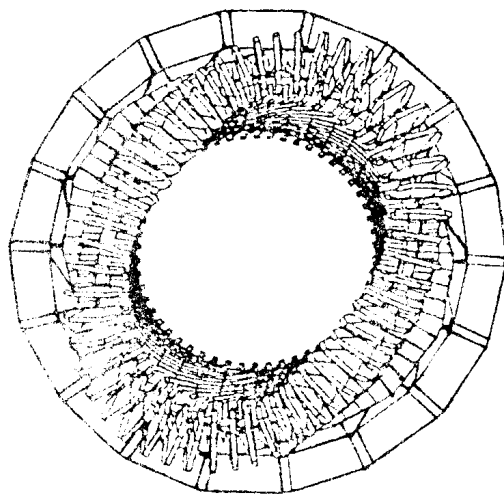


图5 绕组端部的固有振型(98Hz,4节点)

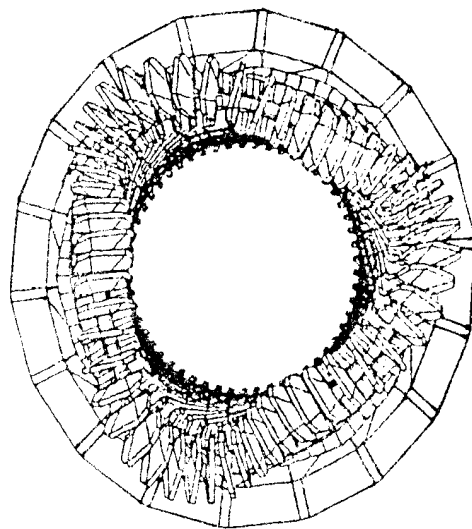


图6 绕组端部的固有振型(136Hz,6节点)

绕组(包括槽部和端部)的可能性(如对头槽楔或备有用预应力螺杆追加力矩),也就是说,要有调整绕组固有振动频率的可能性。其理由是大量绝缘件有一定收

缩量,而且绕组在寿命期内将不可避免的受到各种机械力冲击,如非同期合闸、突然短路及各种系统扰动等等,对于这一点必须加深认识。

在处理定子端部绕组松动问题上,就事论事,松了就“加固”是不对的。所谓“加固”只是停留在原有结构上,绑绑紧、螺钉拧紧或填块填紧。若松动原因不明,加固后,振幅不减很快会导致松动依旧,这方面的教训是深刻的。相反的,上述石横 6 # QFN - 300 - 2 发电机事故后对发生原因分析得较清晰。美国 WH 公司在以往科研开发基础上,对结构作了较大的改动,使 R 和 f 在更改前后有较大的变化,从而改造得比较成功。

在处理定子绕组松动的同时,对定子铁心要进行仔细检查,必要时,对铁心应重新紧固。

2.5 局部放电

其故障模式为手包绝缘不良、机内湿度大 → 局部放电 → 短路。事故特点是短路发生在相间高电位处,运行中机内湿度大或漏油严重,鼻端手包绝缘泄漏电流很大。

1991 年太原一厂 300MW 发电机、1990 年 12 月陡电 7 # 200MW 发电机、1987 年 10 月哈三 1 # 200MW 机、1995 年 11 月马头电厂 7 # 200MW 发电机等等都带有上述特点。

通过这几年努力,对此取得了共识,反事故措施是明确的,效果也很显著。一是测试手包绝缘表面电位用即常说的“电位外移”法或“泄漏电流”法,以保证手包绝缘质量。二是控制发电机机内氢气湿度。

CIGRE/ WG11.01, 94 - 1 调查报告“发电机氢气供应和置换系统”中指出,氢冷电机正常安全运行条件是:纯度 95 ~ 99 %,漏氢量 3 ~ 12 m³/d,最大不能超过 40 m³,氢气露点 - 11 ~ + 12.5 (相当于绝对湿度 1.96 ~ 11 g/m³)。

在 GB7064 - 96“透平型同步电机技术要求”中,对机内氢气温度作了规定,它是以停机状态,且环境温度为 5 时,机内保持相对湿度为 50 %,定作标准的。

降低发电机内氢气湿度应同时从两个方面着手。

(1) 严格执行国标 GB7064 所规定的初级冷却介质入口温度,机内温度高、相对湿度就低。停机时,对定子绕组水内冷发电机应在定子水箱内装设加温装置,继续保持定子冷却水循环以保持机内温度不低于 20 。也可采用降低氢压来确保机内氢气湿度,但氢压不要降至 0.1 MPa 以下。必要时可配置有单独循环

风机的氢气干燥器,以便在发电机停机时仍能干燥氢气。

(2) 减少进入发电机内的水份,合理调整汽封间隙和压力,减少蒸汽进入油系统或将发电机密封油系统加装真空净油装置,使发电机密封油系统与汽机油系统分离可使油中含水量控制在 500 PPm 以下。补充的新鲜氢气湿度露点应低于 - 50 。加之适当选择氢气干燥器的容量,即可达到标准规定的指标。

3 转子故障模式分析

表 2 列出国产大型汽轮发电机转子故障模式分析,与定子不同,转子故障由异常现象较易找到原因。

3.1 关于护环应力腐蚀问题

国内的陡河、徐州、杨柳青等电厂曾发生过 30 多起护环应力腐蚀,产生裂纹。所幸的是发现及时才幸免护环飞逸之灾。主要原因是以往所用护环材料(如 50MnCr72, 50Mn18Cr4, 50Mn18CrWN 等)抗应力腐蚀(SCC)性能差,在潮湿环境中易产生应力腐蚀裂纹。1987 年以来,华北电网对 42 台机组护环进行了超声波检查和复膜金相检查,有应力腐蚀问题的护环占 25.7 %,因应力腐蚀裂纹而更换的护环占 16.6 %^[3]。因此应予以重视。

(1) 对 300MW 及以上发电机,采用抗应力腐蚀性能好的 18Mn18Cr 材料。

(2) 1991 年, CIGRE 发表了“汽轮发电机转子护环用 18Mn18Cr 材料代替的导则”,指出过去 40 年内世界范围约有 30 次护环事故,后果极其严重。认为水冷转子要装监测装置,以及时发现冷却水微渗漏,因为转子水微渗漏直接影响护环表面。空冷发电机、空励磁机(不管开路或闭路通风)均应安装加热器,以防停机时的冷凝结露。氢冷发电机的氢气干燥器,停机时和运行时都应同样工作,要控制气体温度和冷却器进水温度,保持机内氢气湿度在合理范围。转子置于机组外部维修时,应避免转子受潮。对长期存放的转子要进行环境监控。这些都是行之有效的,但是很多方面在我国尚未落实。

(3) 对已运行的护环,应结合定期检修进行仔细普查,如有问题应酌情更换。应力腐蚀裂纹易在护环内表面 R 处应力集中部位或热套配合面发生,如及时发现,裂纹较浅,将其磨掉是很容易的。

(4) 全部用对 SCC 不敏感的 18Mn18Cr 护环取代在役的 18MnCr4 护环在经济上还不易达到,华北电

表 2 转子故障模式分析

异常现象		可能原因	对 策	相应标准 (见附录 2)	在线监测 (见附录 1)
电	转子绕组匝部短路引起转子电流增加	· 铜线有毛刺 · 有异物侵入 · 匝间绝缘“缺肉” · 铜线磨蚀产生铜粉	· 控制生产下线过程的清洁度 · 匝间绝缘垫平,尺寸合适,固化好 · 两根铜线之间放置滑移垫片	JB/ T 8446 阻抗法 20 %,波形 4 ~ 5 %两极电压 5V	RSTD
	局部过热	冷却风道堵塞	进行通风道检验 槽部不允许 < 4m/ s 端部不允许 < 10m/ s	JB/ T 6229	GCM
	表面烧伤	负序承载太大	· 避免异步起动和非全相运行 · 增加发电机转子负序承载能力	JB/ T8445 GB/ T7064	
机	转子振动超标	· 有共振 · 转子零部件松动 · 动静碰撞,如密封瓦 · 绕组匝间短路 · 轴承标高有变化	根据振幅、相位、频谱分析确定原因后消除 轴承座 μm 轴振 μm A 25 80 B 64 165 C 162 260	GB/ T7064	BJVA
	护环上有裂纹 护环应力腐蚀		· 控制发电机内气体湿度 $\leq 4\text{g/ m}^3$ · 必要时用 18Mn18Cr 代替 18Mn5Cr	GB/ T 7064	HDM
	渗漏水 (水内冷)	· 焊缝裂 · 转子引水线疲劳断裂	改进结构工艺	JB/ T 6228	HDM
	集电环及电刷烧损	· 碳粉积累引起环火 · 集电环与电刷接触不好	· 设计时尽量缩小集电环外径,减少损耗 · 改善集电环表面状态		BCM
械	部件断裂后飞逸	· 应力过大 · 低周疲劳	对极间引线、径向导电螺钉、风扇、座环等 重要点评审和质量监控		

力科学研究院等单位开发了 SCR 涂层,使护环金属表面不能与介质直接接触,而且该涂层能与护环坚固结合,在护环装配和运行中不会脱落,该方法值得推荐。

3.2 关于转子绕组匝间短路问题

转子绕组匝间短路是比较常见的问题,文献[2]中叙述了山东省自 1993 年 1 月 ~ 1998 年 6 月发生的 6 起转子绕组匝间短路故障。匝间短路严重时,不仅影响无功出力,引起机组振动,而且导致轴电压升高、大轴和机座磁化,当励端轴承座绝缘有问题时,会烧伤轴瓦及大轴。由于目前大多数火电机组要参与调峰运行,因此,匝间短路故障有增多趋势。

沙岭子 1 # 300MW 发电机 1993 年 4 月发生转子匝间短路接地,烧伤护环,将转子磁化,2 # 发电机于 1995 年 1 月也因匝间短路烧伤护环。

关于转子绕组制造过程中匝间短路问题,应采取

以下措施:

- (1)提高清洁度。转子线圈焊后打磨时要加强保护,避免铜沫进入。转子下线应在封闭间进行。
- (2)松打槽楔。打槽楔前对槽楔去尖打毛刺。
- (3)应注意转子铜线通风孔处的毛刺。每台气隙取气 300MW 转子线圈上有 7 万多个通风孔。
- (4) R 角绝缘尺寸应合适,固化定位后再进行下道工序。
- (5)用阻抗法判断有无动态匝间短路的精度和灵敏度都不够。HEC 某台用阻抗法已合格的 300MW 转子用波形法仍呈现缺陷。本行业现已准备用波形法逐步替代阻抗法,见 JB/ T8446,这也是世界先进国家的发展趋向。

CIGRE 1992 年、1994 年 SC11 会议连续报道了 500MW 发电机作两班制调峰,运行后转子绕组匝间

出现短路现象(1994年11-203论文),许多国家也反映出有同样经历,破坏机理是调峰运行长时间盘车(20~90r/min),转子挠度使转子铜线(一匝常有两半组成)磨蚀产生铜粉致使酿成转子绕组匝间短路,对此作两班制调峰运行的发电机应引起警惕,新设计改进中,在同一匝两根铜线之间加滑移层,是当前国外制造厂解决该问题的有效方法。

3.3 关于发电机振动超标问题

引起机组振动超标的原因很多不在本文研讨范围之内,这里只指出与发电机直接有关的两点。

(1) 引进型300MW发电机的无刷励磁机为单轴承结构,自1978起在石横、汉川电厂投运后,6#机轴振经常超过 $130\mu\text{m}$ 。1991年4月,在济南召开了专家评审会,认为该型机组振动大的根本原因是工作转速距励磁机临界转速裕度太小所致。原设计发电机转速为3600r/min,励磁机临界转速计算值为2450r/min,离开较远,不存在问题,改为3000r/min后,与励磁机实测临界转速2700r/min仅差10%,因此,振动响应偏大。

采用加长轴改变励磁机的临界转速,或改为双轴承可以解决这个问题,制造厂内发电机与励磁机联合平衡,能更清楚地掌握振型,应注意过临界转速时,转子振幅不能超过保护值。但目前正在运行的300MW单轴承无刷励磁机,仍存在着振动超标的问题。

由密封瓦引起的突发振动,石横电厂5#300MW发电机自1987年6月投产至1989年7月,运行期间曾多次发生异常突发振动。该异常振动具有随机性,发电机自1994年调试启动后,一直存在振动问题。自1995年6月,在密封瓦两侧加平衡油压后才得以解决。该机为单流环式油密封,氢、空两侧轴向压力不平衡,加之密封瓦旋转时内圆发热膨胀不均匀,变形与轴碰撞极易诱发频谱无规则的振动,见图7。相应对策是空、氢两侧应仔细调节油压,使密封瓦灵活浮动。

3.4 关于集电环及励磁机故障

据统计300MW发电机励磁系统故障约占发电机总强迫停机的36.5%,其中转子集电环、电刷环火烧损约占励磁系统事故总数的26%^[1]。青山热电厂QFSN-300-2发电机,1996年5月首次启动发电机做完空载、短路试验后,发现该机转子正极集电环高温过热变色,大部分电刷破裂。采用带瞄准器的红外测

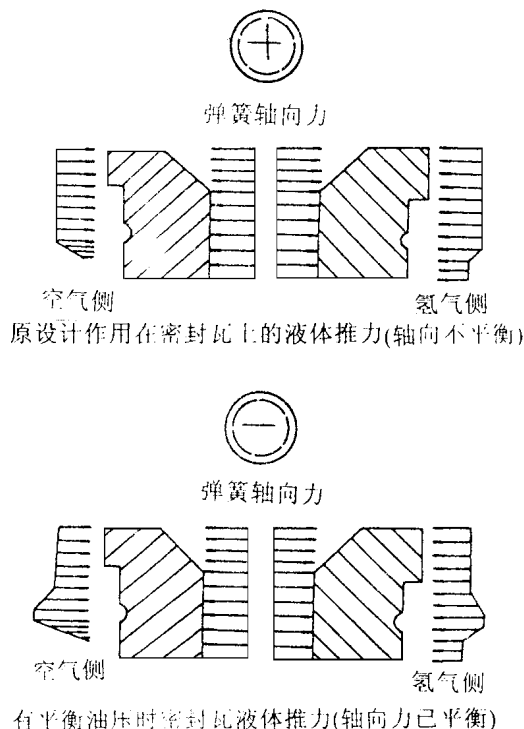


图7 密封瓦轴向受力图

温仪测得电刷接触面(正极)温度达 320°C 。过热的主要原因是集电环摩擦损耗过大(集电环直径 $\Phi 455\text{mm}$)。采用增大进风孔流通截面,改善了冷却效果,并使两环风速趋于均匀。最有效降温措施是在集电环表面涂上凡士林,在集电环表面形成均匀的氧化膜,降低了摩擦系数,有利于电刷电流的均匀分布。

阳逻电厂1#、沙岭子4#、西柏坡1#和通辽1#等均在1995年发生过集电环环火烧伤事故。其原因是集电环直径大、损耗大、通风不良,在局部结构上容易积累碳粉而引起短路。

平圩、哈三600MW、珠江300MW发电机的永磁副励磁机,因引出线固定薄弱而发生过短路,现已解决。

另外,无刷励磁机也有事故发生,如1996年3月,大亚湾2#900MW无刷励磁机正负整流轮短路,江岫7#330MW、北仑港2#600MW的励磁机电枢绕组,都曾短路烧损过。由于无刷励磁方式中备用励磁困难,就更要提高其可靠性。

总之,要对发电机的故障模式进行分析,形成如表1、表2那样的专家诊断的基础,据此提出反事故措施。这些措施的技术依据就是贯彻执行或制定相关的标准,特

别要注意标准中的临界值。这些临界值,是大量科研成果的浓缩,是定量分析的结果,必须很好地理解和遵守。

参考文献

- 1 300MW 引进型机组质量问题调查报告. 电力部安生司, 1997 年 3 月
- 2 山东电力集团公司发电机运行总结. 山东电力科学研究院, 1998 年 6 月
- 3 汽轮发电机护环应力腐蚀技术的研究及应用. 华北电力科学研究院, 1998 年 6 月

附录 1

大型汽轮发电机的在线监测定义

- 1 GENERATOR CONDITION MONITOR (GCM)
发电机工况监测器, 利用分解氢冷却介质中的热分解物来发现发电机部件的发热情况。
- 2 STATOR SLOT(PARTIAL DISCHARGE)
COUPLER(PDM)
定子槽局部放电监测器, 装在部分出线端的定子槽内的宽频带天线(10MHz ~ 1000MHz)上, 其目的是监测定子绕组的高频放电。
- 3 RADIO FREQUENCY(PARTIAL DISCHARGE)
MONITOR TYPE 1(RFM)
无线电频率监测器(1 型), 在发电机中性点接一变压器检测无线电频率(10kHz ~ 30MHz)设备, 用于监测定子绕组绝缘的放电。
- 4 ROTOR SHORTED TURN DETECTOR(RSTD)
转子匝间短路监测器, 装在定子的气隙侧的测量转子磁场波形的设备, 通过转子磁场的不规则性来发现转子的匝间短路。
- 5 BRUSH CONDITION MONITOR(BCM)
电刷工况监测器, 测量电刷和滑环间的压降以监测电刷滑环的工况, 有的还可测量更多参数, 如电刷温度, 电刷位移、滑环表面轨迹以及环境温度和湿度等。
- 6 STATOR ENDWINDING VIBRATION MONITOR (SEVM)
定子端部绕组振动监测器, 利用光导传感器或加速度测量计监测定子绕组端部系统的振动。
- 7 HYDROGEN DEWPOINT MONITOR(HDM)

氢气露点监测器, 测量氢气湿度并且将以其表示为露点的设备, 用以保证氢气的干燥程度。

- 8 STATOR COOLING WATER (SCW) CONDUCTIVITY CELL (SCW)

定子冷却水导电率计, 通过测量定子冷却水的导电率以监测其纯度的设备。

- 9 HYDROGEN INTO WATER LEAKAGE MONITOR (HLM)

氢气漏入水中监测器, 一套用以测量氢气进入定子冷却水的设备。

- 10 BEARING JOURNAL VIBRATION(ORBIT)
ANALYSER(BJVA)

轴承振动分析仪, 一套装在汽轮发电机组每一轴承上的双传感器, 通过观察轴的轴迹和平均位置的幅值和性质来诊断其振动问题。

附录 2

- | | |
|------------|-----------------------|
| GB/ T 7064 | 透平型同步电机技术要求 |
| JB/ T 6227 | 氢冷电机密封性检验方法及评定 |
| JB/ T 6228 | 汽轮发电机绕组内部水系统检验方法及评定 |
| JB/ T 6229 | 汽轮发电机转子直接氢冷通风道检验方法及限值 |
| JB/ T 8445 | 三相同步发电机负序电流承受能力试验方法 |
| JB/ T 8446 | 隐极式同步发电机转子匝间短路测量方法 |
| JB/ T 6204 | 大型高压交流电机定子绝缘耐电压试验规范 |

收稿日期: 1998. 06. 03

沈梁伟 (Shen Liangwei)

生于 1940 年 1 月。1962 年毕业于浙江大学电机系, 一直从事发电机的设计研究工作, 现任 CIGRE/ SCII 中国委员, 副总工程师, 教授级高级工程师。

联系地址: 哈尔滨大电机研究所总师办
邮政编码: 15004

