

高压电气 设备绝缘 诊断技术

雷国富 陈占梅等 编著 ● 水利电力出版社

高压电气 设备绝缘诊断技术

雷国富 陈占梅等 编著

水利电力出版社

(京)新登字115号

高压电气设备绝缘诊断技术

雷国富 陈占梅等 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.25印张 226千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 0001—1790册

ISBN 7-120-01981-3/TM·536

定价 9.80元

内 容 提 要

本书是根据我国多年来高压电气设备发生过事故和故障情况，结合几十年来电气设备预防性试验的经验，从分析故障规律、绝缘结构及其特点入手，利用成熟的测试手段和方法，介绍一套较为有效的设备绝缘故障诊断技术。

本书的内容来源于实践，并以实用为目的而编写的，理论分析较少，论述的设备主要是发电机、变压器、互感器等电气设备的绝缘问题和部分新的较为成熟的现场测试技术。

本书可供发电厂、变电所及科研部门的电气设备专业技术人员阅读和使用，也可供制造部门的技术人员和大专院校的师生参考。

前 言

自50年代以来，我国一直坚持电气设备预防性试验，基本上能及时发现设备缺陷问题并进行处理，从而使设备处于良好状态，对保证电力系统的安全、稳定运行起到了有效监督作用。

经过几十年的实践，测试技术有了很大的发展和提高并积累了大量的经验。为了进一步提高高压电气设备故障诊断的有效性和准确性以及提高电气设备运行的可靠性，我们编写了本书。

本书编著分工如下：

第一、二、三、四章的第一节	陈占梅
第一章的第二节至第三节	冯复生
第二章的第二节，第三节的一~六	雷国富
第二章第三节的七和八	凌 慙
第三章的第二节至第四节	陈 英
第四章的第二节至第四节	万 达
第五章	叶大邕
第六章	朱匡宇
第七章	胡惠然
第八章	王乃庆

全书由雷国富、陈占梅主编。

本书承华东电管局高级工程师马延绪同志审阅，对他提出的许多宝贵意见，我们表示衷心地感激。

本书在编著中吸取了许多电力部门的好经验，并引用了一些实例，特此致谢。由于水平有限，不当之处，请指正。

编著者

1993年6月

目 录

前 言

第一篇 诊 断 技 术

第一章 发电机的绝缘故障诊断	1
第一节 绝缘事故类别和原因分析	1
第二节 绝缘结构特点	7
第三节 绝缘故障诊断	10
第二章 变压器的绝缘故障诊断	66
第一节 绝缘事故类别和原因分析	66
第二节 绝缘结构特点	77
第三节 绝缘故障诊断	91
第三章 电流互感器及电容型套管的绝缘故障诊断	167
第一节 绝缘事故类别和原因分析	167
第二节 结构特点	169
第三节 常见绝缘故障分析	176
第四节 绝缘劣化的诊断	185
第四章 串级式电压互感器的绝缘故障诊断	197
第一节 绝缘事故类别和原因分析	197
第二节 结构特点	200
第三节 常见绝缘缺陷分析	203
第四节 绝缘诊断	209
第五章 绝缘诊断技术的管理	224
第一节 加强绝缘诊断的组织管理	225
第二节 绝缘试验中应注意环境气象的影响	227

第三节 加强对试验结果的综合分析和判断·····	230
--------------------------	-----

第二篇 现场耐压试验和局部放电测试技术

第六章 发电机超低频耐压试验和工频谐振

耐压试验技术·····	236
-------------	-----

第一节 超低频耐压试验及其介质特性分析·····	236
--------------------------	-----

第二节 工频谐振耐压试验·····	247
-------------------	-----

第七章 电力变压器操作波感应耐压试验技术····· 254

第一节 概述·····	254
-------------	-----

第二节 试验电压的波形、幅值、极性·····	255
------------------------	-----

第三节 试验结线的选择·····	257
------------------	-----

第四节 试验回路及有关参数的选定·····	260
-----------------------	-----

第五节 试验波形和试验回路效率的估算·····	265
-------------------------	-----

第六节 变压器等效电容 C_2 的简化计算·····	270
------------------------------	-----

第七节 电容电流的估算及示伤电阻的选定·····	274
--------------------------	-----

第八节 试验中的故障判断·····	275
-------------------	-----

第九节 试验的有效性及注意事项·····	278
----------------------	-----

第八章 局部放电的现场测试技术····· 281

第一节 概述·····	281
-------------	-----

第二节 局部放电的探测或测量·····	282
---------------------	-----

第三节 电机定子绝缘的局部放电试验·····	289
------------------------	-----

第四节 变压器局部放电试验·····	297
--------------------	-----

第五节 互感器的局部放电试验·····	311
---------------------	-----

第六节 直流电压下的局部放电测量·····	313
-----------------------	-----

参考文献·····	317
-----------	-----

第一篇 诊 断 技 术

第一章 发电机的绝缘故障诊断

第一节 绝缘事故类别和原因分析

根据多年来国内大型发电机的运行、试验以及事故分析表明：由于设计制造、安装和非正常运行造成的缺陷，在电、热、机械、化学等因素作用下逐渐发展导致了绝缘损坏的事故。就事故类别和原因可分为如下几种。

一、定子绕组绝缘击穿

根据多年来的统计，造成定子绕组绝缘击穿的事故约占发电机事故总数的1/3，主要原因是绝缘老化、磨损和受潮。

(1) 绝缘老化击穿。主要发生在运行20年以上的中小容量的发电机上。它们的绕组大部分是沥青云母绝缘，因运行年久、流胶严重，或因制造不良、浸胶不透，内部发空、脱壳、松散，使电气和机械强度降低导致击穿事故。

(2) 绕组绝缘磨损。主要发生在制造工艺不良，端部固定不当的发电机上，TQN-100-2型发电机在运行初期这类绝缘损坏事故较多。造成磨损的主要原因是绕组成形不规则、几何尺寸偏差大、外型不平整，在下线时没有垫好、垫实、线棒在槽内出现松动、悬空现象；上、下层线棒之间的垫条也未按设计要求垫够，致使线棒出槽后就没有间隙；绕组端部不规则、与绑环间既未靠紧，也没垫实，只用线绳绑扎固定。由于大型发电机线负荷比较大，运行中产生较大的

电磁交变应力，在端部固定不好的情况下，便产生相对运动，一般运行10000h左右即可发现磨损，且一旦发现时，磨损已很严重，磨损面积大，有的已露铜。

(3) 绕组绝缘受潮。主要原因有：发电机水冷却器结露；氢冷发电机补氢时氢中带水，密封漏油，油中带水；机房地板漏水进入发电机内等，使绝缘受潮导致击穿。

二、双水内冷发电机漏水造成绝缘击穿

(1) 转子漏水。其原因主要是因绕组的引水拐角断裂和绝缘引水管（亦称复合管）破裂。

初期制造的QFS-125-2型和QFS-300-2型双水内冷发电机，有的转子绕组引水拐角采用铜管，铜的疲劳极限较低，运行中在离心力导致线圈外移引起的静应力和由转轴引起的交变动应力的重叠作用下，易发生疲劳断裂漏水。如有的发电机运行不到两年即发生大号线圈拐角断裂漏水事故。此外，若引水拐角组装工艺不当，在机组启、停时拐角受到的低周疲劳应力会增加，也会引起断裂漏水。如有的发电机启、停近100次，运行达60000h或更多时，小号线圈拐角也发生过断裂漏水。为了消除拐角断裂缺陷，制造厂从结构和材料上作了改进，收到了较好的效果。

转子绝缘引水管破裂主要是因管材质量差，使用寿命短，在运行中造成开裂、鼓泡、脱层损坏。此外接头处装配工艺不良往往也易将引水管压断，发生漏水。如一台QFS-300-2型发电机在运行中机内湿度突然上升到50%，差动保护动作跳闸，停机开盖检查，发现发电机转子励磁机侧引水管开裂漏水，造成定子励磁机侧端部绕组相间短路，烧坏多个端部线圈，部分铜线烧熔、烧断。

(2) 定子漏水。其原因有引水管质量差，发生破裂漏

水；引水管交叉排列绑扎不牢，运行中互相摩擦破裂漏水；引水接头焊口裂纹漏水；空心导线有砂眼或裂纹漏水。如一台QFS-125-2型发电机运行中造成绝缘击穿，经检查发现是因一槽内空心铜线有约1.5cm长的裂纹漏水所致。

三、水内冷发电机定子绕组空心导线内堵塞

定子绕组空心导线由于堵塞冷却水流通不畅，致使局部绝缘过热流胶。

如定子绕组空心铜线，在运行中受到化学和电化学腐蚀，铜线内部的氧化铜薄膜影响散热，薄膜脱落后，尽管在水流和电磁振动作用下，仍会引起堵塞，冷却水流量减少，使绕组温度逐渐上升。某电厂一台QFS-125-2型发电机有两个定子槽的上层线圈内孔堵塞，使得线圈温度升高30℃以上，被迫停机处理。经对空心铜线的解剖，发现铜线内壁有一层黑色的氧化铜薄膜。对杂物分析表明：其中氧化铜重量占全部杂物的87.8%。也发生过其他异物堵塞，如转子出水支座内涂层脱落的碎片，石棉盘根磨损的粉粒等造成的堵塞。

四、定子铁心烧损

定子铁心烧损后，修复困难，工期也长，造成定子铁心烧损的原因有以下几种情况。

(1) 有的发电机在制造时下层线圈与槽底是胶牢的，由于所用的半导体胶搅拌不匀，石墨沉积，将槽底部分铁心表面短路，造成涡流发热，及至将绕组烧损。曾发生过多起这类事故。

(2) 制造或检修中遗留下的金属工具或金属切削以及焊渣等未认真清除，造成铁心短路烧损。在大型发电机上曾发生过这类事故，有的被迫返厂大修。

(3) 对某些紧固件，紧固方式不当，无锁紧措施，在

运行中受电磁力作用松动脱出,打坏铁心。曾有一台发电机,因定子绕组端部压板螺丝脱落,窜入发电机气隙内,将定子铁心和转子表面打伤。另一台发电机的转子平衡螺丝未冲紧锁牢。在运行中甩入定子膛内将铁心打伤,引起矽钢片局部短路过热,烧坏线棒绝缘,造成短路和接地,导致定子两个槽的上层四根线棒烧断,铁心大面积烧伤,铁心齿表面多处机械损伤。

五、定子绕组端部接头焊接不良

定子绕组端部常因并头套焊接不良,运行中发热开焊烧损绝缘。如:

(1) 一台TQN-50-2型发电机由于并头套假焊、虚焊严重,并有断股,造成运行中严重发热,将表面1/4圆周绝缘烧焦,绑线烧断,与绑环间衬垫的绝缘表面烧焦,形成单相短路接地。

(2) 一台TQN-100-2型发电机,并头套焊接不良,内又无充填物,运行中线圈股线振动、断股、发热,直至熔断。

六、机内存留异物

如一台QFQS-200-2型发电机,投产不久由于异物,将绝缘磨损,造成相间短路,烧损大面积绝缘,致使一台新的200MW发电机全部更换线圈。修理时从机内清除出几公斤金属杂物。

七、定子相间短路

定子相间短路主要是由于定子绕组端部绝缘有缺陷而造成相间击穿。如一台QFQS-200-2型发电机投运不久,便在励磁侧端部引线A、B相发生相间击穿,且短路点的电压接近额定电压。经检查发现故障区中心处于手包绝缘区域内,距模压绝缘搭接口较近。绝缘烧损、开裂,烧伤孔洞直径约

为40mm，故障槽内下层线圈烧断铜线23股（共30股铜线），上层线圈烧断20股铜线，附近槽线圈的绝缘表面被烧伤，部分端部水管接头烧断，绝缘开裂，线圈变形。经检查还发现转子两侧护环和本体嵌装面有过热痕迹与电烧伤的凹点，严重处有裂纹，转子回路的灭磁开关消弧触头全部烧毁。该事故造成的损失和影响都很大。

通过检查试验，认为事故部位的手包绝缘是薄弱环节。主绝缘未伸入绝缘盒内，手包绝缘固化不良，导线间充填不实，绝缘的整体性差，运行中在电磁振动作用下，产生裂缝，故障部位的固有振动频率接近100Hz，可能发生较大的机械振动。这不仅对绝缘带来不良的作用，而且对空心铜导线也会造成损伤。此外，由于运行中密封瓦向机内漏油，且油中含有水分，使机内存在带水的油雾，而故障部位又处于高电位处，绝缘缝隙在带水的油污作用下，导致绝缘击穿事故。

八、转子通风系统堵塞烧损绝缘

氢内冷发电机转子通风孔堵塞，严重烧毁转子的事故有如下两种类型。

（1）转子通风孔掉入金属异物，既造成转子绕组匝间短路，又会堵塞通风孔，从而烧毁转子绝缘。如一台QFQS-200-2型发电机，转子为氢内冷，运行中发现轴承振动时大时小，并发现从机内向外喷烟随即消失的现象，在停机过程中当转速下降到1700~750r/min时，出现强烈振动。在检查中发现转子绕组端部有4个铝屑，分析认为是这些铝屑在转动中造成转子绕组匝间短路，使机组发生振动。在检查中还发现，转子三风区严重过热，有大量的通风孔被过热的玻璃丝带堵塞，励磁侧端部绝缘已焦糊开裂，其他风区之间的

隔板、垫块发生脱落和偏斜。由于整个转子遭到严重损坏，迫使转子返厂彻底更换绝缘。

(2) 转子槽部通风不畅，绝缘严重过热。对侧面铣槽的氢内冷转子，由于制作工艺、结构等原因发生这类事故较多。

如一台 QFQS-200-2 型发电机在运行中曾 4 次发出转子接地信号，停机检查中发现，汽机侧对轮外缘的磁力能吸住 10cm (4 英寸) 扳手。在试验中发现转子绕组存在稳定匝间短路，经拔护环和打槽楔检查，除发现绕组端部匝间短路外，还发现第三风区绕组绝缘严重过热，第五、七风区次之。其中三风区槽楔下 11mm 厚的垫条，已被烧损 5~6mm，铜线过热发兰色，有的已烧结在一起，部分槽衬绝缘已烧成玻璃丝团状物，将风孔全部堵死，槽衬及匝间绝缘已变成深褐色或黑色，其他部分的导线及绝缘也有不同程度的过热现象，总之，整个转子普遍严重过热，被迫返厂全部更换绝缘。

造成该转子严重过热的根本原因就是转子内部通风不畅。就整个转子通风水平来看，大约有 27% 的通风孔的风速低于 2.5m/s，低风速的风孔占的比例太大，冷却效果差，而第三、五、七热风区内各风孔的风速也比较低，平均风速只有 2.7m/s，其中低于 2.5m/s 的风孔数占 35%。这些低风速的风孔数远大于制造厂的规定数，可见该转子的通风冷却效果很差，因而投运不久便造成普遍严重过热烧毁。发生堵塞风道的主要原因有：

1) 槽衬过热后便沿着风孔鼓胀变形，从而减小风道通风截面，通风量减小，槽衬进一步发热，继续膨胀，恶性循环，致使投运不到两年即发生如此严重的过热。

2) 槽底垫条与通风孔错位，少则 2~5mm，多则 10~

15mm，有的匝间绝缘垫条开孔不足或只开半孔，还有棉花团以及松散的云母片等杂物，严重堵塞了风孔。

九、转子线圈匝间短路

转子匝间短路多发生在绕组端部，因端绝缘工艺处理难度较大，特别是绕组弯角处，若导线的弯曲成形和绝缘处理不好，运行中在离心力的作用下，可能会损伤匝间绝缘，引起匝间短路，且匝间绝缘、机械强度差，脆而易碎，在端部又难以固定牢靠，也容易发生磨损脱落，引起匝间短路。

此外，制造厂检查不严，在转子内遗留大量异物，致使运行中造成匝间短路和接地。如一台TQN-100-2型发电机在运行中转子频繁发生匝间短路和接地信号，被迫抽转子拔护环检查，发现端部有很多铝屑。还有的发电机从转子通风孔内吹出许多小云母碎片等杂物。

有些发电机运行时间较长，曾发生转子绕组端部导线断裂，槽口绝缘烧焦脱落，匝间绝缘和铜线表面存在不同程度的烧伤和裂纹。这可能是长期受热应力作用疲劳断裂所致。

第二节 绝缘结构特点

一、定子绝缘结构

发电机定子绝缘目前存在三种结构，即烘卷式云母绝缘、沥青云母连续绝缘和环氧粉云母连续绝缘。

烘卷式云母绝缘用于槽内直线部分，它是在电话纸上刷虫胶漆、粘贴白云母片，再由卷包机包紧后热压固化而成；而端部绝缘则用黄蜡布或云母带及玻璃漆布带包扎。

沥青云母带连续绝缘是用沥青云母带连续包扎后，在浸胶罐内用真空压力浸渍而成。这种绝缘结构工艺复杂，对于

6.3kV电压等级，一般浸胶一次；对于10.5kV电压等级包6~7层云母带后浸胶一次，再包至12~13层再浸一次；对于13.8kV或18kV电压等级，一般需浸3~4次。每次浸胶前要包一层浸胶带，浸胶后要剥掉重包一层布带，加热复形，每次浸胶约30多小时或更长的时间。

环氧粉云母绝缘是目前较为通用的新型绝缘材料，属于热固性绝缘。按制造工艺，又有两种结构，一种为环氧粉云母少胶带真空压力浸渍结构，另一种为环氧粉云母多胶带模（液）压结构。也有少数国家采用环氧片云母绝缘。在多胶带绝缘结构中，一般采用酚醛环氧树脂作为粘合剂的主要成分，也就是采用高粘度的环氧树脂。少胶带绝缘结构中有些制造厂采用脂环族和脂肪族环氧树脂作为浸渍剂的主要成分，也就是采用低粘度的环氧树脂。一般而言，多胶带绝缘结构贮存期短，长期耐电性差，生产能力大，成本低；少胶带绝缘结构贮存期长，制造容易，但胶量分布不易均匀，渗透较差。

我国于1965年前后开始应用环氧粉云母绝缘结构，主要采用1431号桐油酸酐环氧漆和5438-1号环氧玻璃粉云母带。

（1）1431号桐油酸酐环氧漆。主要成分为50份TOA（桐油酸酐）、35份6101环氧树脂及15份604环氧树脂。其中溶剂为丙酮和甲苯（重量比为1:1），TOA为3份桐油及0.85份顺丁烯二酸酐。

（2）5438-1号环氧玻璃粉云母带，由TOA-6101-604胶和二层0.025mm厚的玻璃布或0.03mm玻璃布中间夹一层0.05mm粉云母纸所组成，厚度为0.14mm或0.16mm。

编织、成形和胶化后，铜线表面刷一层595-6101-501胶后用云母带一次包扎，并经模压或液压成型。

目前国内生产的600MW发电机定子绕组,采用少胶带粉云母绝缘结构,粉云母纸为508型,衬强材料为经脱蜡后处理的玻璃布,再经环氧硅处理,浸渍胶为53841Pu树脂。其绝缘性能和美国西屋公司的产品相近,如表1-1所示。

表 1-1 绝缘性能比较表

种 类		国产少胶带 绝缘结构	西屋公司少胶 带绝缘结构	国产TOA 绝缘结构
击穿场强(kV/mm)		28	25	29
tgδ(%)	室 温	1~2	1.2	0.8~1.0
	130℃			<6
	155℃	<6	<6(150℃)	
Δtgδ(%)		<1	<1	0.4~0.5
抗弯强度 (Pa)	室 温	2840×10 ⁵		2800×10 ⁵
	热 态	310×10 ⁵ (130℃)	435×10 ⁵ (80℃)	423×10 ⁵ (130℃)
冲击强度(Pa)		32.3×10 ⁵		10.9×10 ⁵

二、转子绝缘结构

汽轮发电机转子绕组的绝缘结构由两部分组成:即匝间绝缘和主绝缘(包括转子端部绕组对护环的绝缘)。转子绝缘结构如表1-2所示。氢内冷转子绕组匝间绝缘通常用环氧玻璃布板刷胶与铜线粘结一起,气体外冷或水内冷发电机转子绕组匝间绝缘通常用环氧玻璃布板或复合纸垫条,外包薄膜粘带。

为了适应大机组启停要求,有时采用绝缘表面粘接滑移层的办法来减少摩擦系数。一般在护环绝缘内表面、槽楔下