

发电机故障检查 分析及预防

李伟清 王绍禹 主编

中国电力出版社

前 言

当前，我国的电力工业已进入发展大电网与大机组的新阶段。各大电网结构中，500kV 输电主干网络正逐渐形成，200~300MW 及以上容量的大型发电机组已成为电网的主力机组，采用先进技术和具备高度自动化水平的现代化电网正逐步建成。

同步发电机是生产电能的基本设备，是电网的心脏，它的运行可靠性直接影响电网运行及向用户安全、经济地供电。现代大型同步发电机在结构设计方面不断采用着一系列旨在提高可靠性和经济性的新技术；同样重要的，必须严格按照其技术条件和要求进行运行与维护，才能保证长期安全、经济、可靠地提供电力。

电机运行事故是当前我国发展电力工业方面存在的重要问题之一，一些恶性事故给国民经济带来了巨大损失。多年来的事故统计资料表明，许多事故的发生都与电机设计及制造质量有关；同时，也反映出运行维护方面尚存在不少问题。需要认真总结经验和教训，认真下功夫，不断改进与完善发电机的设计和制造质量，认真提高运行维护水平。

本书系统叙述近年来我国发电机运行中发生的事故（或故障），特别是近几年来发生的性质严重、影响较大，且在一定程度上带有普遍性的事故，分析其原因，并提出防止对策；同时探讨一些发电机运行与试验研究工作的新动向和经验，提供电机制造和运行部门，在改进产品设计、工艺及产品质

量和提高运行维护水平方面的参考和借鉴。

本书由一些长期从事发电机试验研究工作的高级工程师们编写。全书共十二章，各章节执笔的顺序为：第一章，第四章的第一、三节，第六章，第十一章的第二节，第十二章由李伟清编写；第二章的第一节由冯复生编写；第二章的第二、四节，第三章，第八章由王绍禹编写；第二章的第三节由郝常骥编写；第二章的第五节，第五章的第二、三节由尤儒臣编写；第四章的第二节由阮仕荣编写；第五章的第一节由张国权、白亚民编写；第七章的第一至三节由崔力编写；第七章的第四节由马庆平编写；第九章，第十一章的第一节由徐英杰编写；第十章由张葆昌编写。

全书由李伟清、王绍禹任主编。由华北电业管理局副总工程师陈荣德高级工程师审阅并提出许多宝贵意见，在此深表谢意。

由于作者们水平所限，书中疏漏、不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1995 年 12 月

目 录

前 言

第一章	绪论	1
第一节	发电机事故概况	2
第二节	发电机严重事故的典型事例	7
第三节	提高发电机运行可靠性的根本途径	11
第二章	定子绕组故障	13
第一节	定子绕组绝缘故障	13
第二节	定子绕组导线的断股	26
第三节	定子绕组的接头事故	45
第四节	定子绕组空心导线堵塞	54
第五节	定子绕组漏水	59
第三章	定子铁心故障	72
第一节	片间绝缘的损坏	72
第二节	有效铁心压装的变松	73
第三节	电阻温度计损坏引起有效铁心的故障	76
第四节	相间短路引起的定子铁心损坏	77
第五节	定子铁心试验	79
第四章	转子绕组的常见故障	86
第一节	转子绕组的对地绝缘故障	86
第二节	转子绕组匝间短路	101
第三节	转子绕组热变形	116
第五章	直接冷却转子绕组的故障	131
第一节	直接氢冷转子绕组通风道的局部堵塞与转子温度场	

	的计算	131
第二节	直接水冷转子漏水	155
第三节	水内冷转子绕组局部堵塞	168
第六章	负序电流引起的转子损坏	181
第一节	不对称运行对发电机的影响	181
第二节	负序电流烧损转子的实例及特征	185
第三节	发电机承受负序电流的能力	192
第四节	发电机不对称运行后的检查及处理	197
第七章	转子护环损坏及强度计算	200
第一节	转子护环事故概述	200
第二节	护环裂纹的性质、成因和机理	202
第三节	防止护环开裂的技术措施	213
第四节	汽轮发电机护环强度的计算	217
第八章	机组磁化与退磁、轴电压及转轴的合理接 地方式	230
第一节	汽轮发电机组的磁化与退磁技术	230
第二节	汽轮发电机组的轴电压及转轴的合理接地方式	265
第九章	氢冷发电机漏氢和氢气爆炸	272
第一节	氢气爆炸事故及预防	272
第二节	氢冷发电机漏氢	276
第三节	漏氢量检测及计算	280
第十章	发电机的振动	287
第一节	振动的原因和类型	287
第二节	转子绕组匝间短路引起的振动	290
第三节	气隙不均匀和电磁谐振引起的电磁振动	295
第四节	转子中心位置偏移引起的振动增大	297
第五节	不对称负荷引起的电磁振动	300
第六节	定子绕组端部电磁振动	300
第十一章	附属设备故障	302

第一节	油系统故障	302
第二节	气体冷却器的故障	310
第十二章	大型发电机的运行监测和诊断	318
第一节	实现运行监测和诊断的重要性	318
第二节	定子绕组绝缘在线监测	319
第三节	发电机局部过热监测及诊断	321
第四节	定子绕组端部振动监测系统	323
第五节	转子绕组匝间短路监测	325
第六节	氢冷发电机的氢气湿度检测	328
第七节	汽轮发电机组扭振监测与诊断	329
参考文献		334

第一章 绪 论

随着国民经济的持续发展,我国的电力工业已进入大电网与大机组的发展阶段。至1995年末,即第八个五年计划(1991~1995)胜利完成为止,全国发电机总装机容量已达210000MW,全年总发电量10000亿kW·h。目前,我国已并网运行的发电机单机最大容量为600MW,已运行的机组中200MW及以上的大机组容量达89200MW,占总装机容量的42.4%,300MW、600MW发电机组已成为电网的主力机组。

为使我国电力工业稳定、快速、高效能地增长,最大限度地与国民经济发展需要相适应,在发展电力工业的同时,进一步提高机组的设计制造水平,提高运行管理水平,使发电机组达到安全、可靠、满发,是一件首要任务。

最近十几年的发展中,由于我国电机制造和运行部门广大职工的积极努力,电机制造和运行管理水平有着长足的进步和提高。总的说来,已并网运行的发电机组,绝大部分能够安全满发。从已运行的200~300MW发电机组试验表明,在额定工况时,能够达到铭牌出力;各项技术参数和性能能够满足各种运行方式的要求。根据历年统计资料,在发电事故总数中(包括锅炉、汽机、发电机及辅机),发电机事故率是最低的。

同时,也应指出,当前我国的电机制造水平,特别是产品质量,还存在许多不尽人意之处;运行管理水平、机组安装及检修质量也存在不少问题。突出反映在近几年来大容量

发电机运行中事故较多，事故的性质严重，损失巨大。如国产机组频繁发生的定子端部短路事故，严重烧损定子绕组和铁心；发电机非全相运行，负序电流烧损转子；因轴系振动而损坏整个机组；以及氢冷发电机氢气爆炸引起的人员伤亡和设备严重损坏等。

第一节 发电机事故概况

表 1-1 系自 1959 年到 1976 年间我国发电机事故率（台次/百台）统计^[1]。表 1-1 表明，1971 年发电机的事故率是历

表 1-1 1959 年以来我国发电机事故率统计 台次/百台

年 份	每百台事故 台 次	事故率 (%)	年 份	每百台事故 台 次	事故率 (%)
1959	7	1.62	1977	54	4.03
1960	24	4.22	1978	39	2.54
1961	24	4.17	1979	38	2.38
1962	20	3.47	1980	51	3.08
1963	11	3.82	1981	47	2.7
⋮	⋮	⋮	1982	48	2.77
1971	89	9.23	1983	46	2.57
1972	50	4.82	1984	25	1.38
1973	50	4.34	1985	43	2.28
1974	67	5.46	1986	97	4.83
1975	52	4.22	1987	101	4.92
1976	45	3.50			

年中最高的。这是与1970年那次波及全国的不尊重科学，盲目地搞“超发”，导致大批发电机过热烧损有关。从表1-1还可看出，近几年发电机事故率有上升的趋势。特别引以注意的是100~200MW及以上的国产大型发电机事故次数较多，性质亦较严重。有的属于设计和制造质量问题的事故在同型机组上重复发生未能及时获得解决。此外，运行部门对大电机运行的技术条件和要求未能严格执行，往往成为事故发生的诱发因素。

表1-2及表1-3分别为1984~1987年全国发电机事故按容量及运行年限分类的统计表。

表 1-2 事故按容量分类统计表

年份	事 故 台 次						累计 台次
	300MW 及以上	200~299 MW	125~199 MW	100~124 MW	50~99 MW	49MW 及以下	
1984	0	4	3	3	8	7	25
1985	3	6	2	4	9	19	43
1986	8	19	9	20	17	24	97
1987	2	27	7	18	18	29	101
总计	13	56	21	45	52	79	266

表 1-3 事故按运行年限分类统计表

年份	事 故 台 次					累计 台次
	投运 1~2年	投运 3~5年	投运 6~10年	投运 11~20年	投运 20年以上	
1984	5	4	8	6	2	25
1985	7	4	11	14	7	43
1986	20	7	22	33	15	97
1987	24	16	13	27	21	101
总计	56	31	54	80	45	266

表 1-2 及表 1-3 的事故统计表明, 200MW 及以上的汽轮发电机事故率约占事故总台次的 25.9%; 投运仅 1~2 年的发电机事故率达 56 台次, 占 21%, 表明容量 200MW 及以上的发电机事故率最高。

发电机事故按制造厂分类统计如表 1-4 所示。

表 1-4 发电机事故按电机制造厂统计表

事故 年份	制造厂 上 海 电机厂	哈 尔 滨 电机厂	东 方 电机厂	北 京 重 型电机	前苏联 制造厂	其他国家 制造厂	累 计
1984	7	2	6	4	2	4	25
1985	8	10	7	5	3	10	43
1986	38	22	12	10	6	9	97
1987	24	29	11	10	9	18	101
总计	77	63	36	29	20	41	266

表 1-5 及表 1-6 为发电机事故按部位及原因分类表。

表 1-5 发电机事故按部位分类表 台次

序号	发 电 机 事 故 部 位	年 份				累 计
		1984	1985	1986	1987	
1	定子绕组绝缘击穿	2	5	13	14	34
2	定子绕组相间短路	8	7	2	9	26
3	定子绕组端部接头、引线接头过热		2	4	4	10
4	定子铁心烧伤		2	1	1	4
5	发电机内部氢气爆炸或起火	1		1	3	5
6	发电机漏氢	2	1	13	13	29
7	定子绕组漏水			10	6	16

续表 1-5

序号	发 电 机 事 故 部 位	年 份				累 计
		1984	1985	1986	1987	
8	转子绕组引水导线断裂、拐角漏水	2	4	4	5	15
9	转子其余部分漏水		1	16	5	22
10	转子绕组接地或匝间短路	1	3	4	4	12
11	转子绕组极间连线断裂	1				1
12	转子绕组过热	1				1
13	转轴磁化			1		1
14	负序电流损伤转子		4	1	1	6
15	异步起动损伤转子	1	1		2	4
16	联轴器螺丝断裂		1	1	1	3
17	密封瓦温度高、零件磨损			1	3	4
18	发电机漏油			1	2	3
19	电刷、集电环冒烟		3	4	9	16
20	发电机失磁异步运行	3	3	5	4	15
21	水冷发电机断水	1		1	2	4
22	其他	2	6	14	13	35
总计		25	43	97	101	266

表 1-6

发电机事故按原因分类表

台次

序号	发 电 机 事 故 原 因	年 份				累 计
		1984	1985	1986	1987	
1	绝缘老化	2	6	4	11	23
2	硅钢片断裂、压圈松动、绝缘垫条外移损坏绝缘	1	2	1	3	7
3	定子线棒振动、磨损绝缘	2	1			3
4	定子引水管破裂、水电接头焊接不良、空心导线断裂漏水	3	1	4	3	11

续表 1-6

序号	发 电 机 事 故 原 因	年 份				累 计
		1984	1985	1986	1987	
5	定子绕组端部接头、引线接头焊接不良		2	1	1	4
6	定子端盖密封垫、引出线、冷却器、密封瓦等漏氢	1	1	7	9	18
7	定子线棒绝缘引水管内部闪络		1			1
8	转子绕组引水导线拐角疲劳断裂、水电接头焊接不良、绝缘管裂纹	3	5	7	1	16
9	转子振动大				1	1
10	转子绕组匝间短路			1		1
11	转子绕组极间连线断裂	1				1
12	转子超速		1	1	2	4
13	转子通风孔或空心导线堵塞	1			1	2
14	转子护环键甩出		1			1
15	励磁机联轴器螺丝断裂	1	1			2
16	密封瓦磨损			1		1
17	电刷接触不良、碳粉堆积		3	1	6	10
18	密封油管、法兰等焊接不良			2	1	3
19	水冷发电机断水				1	1
20	非同期并列	1			3	4
21	发电机内氢气未排净	1			1	2
22	定子绕组相间短路	1			3	4
23	制造质量不良	2	6	24	22	54
24	维护管理不当、误操作	3	6	27	19	55
25	其他	2	6	16	13	37
总计		25	43	97	101	266

第二节 发电机严重事故的典型事例

一、定子绕组相间短路烧损事故

自 1983 至 1990 年 7 年间,在 11 台国产 200MW 氢冷发电机上共发生过 15 台次定子绕组相间短路事故,造成定子线棒严重烧损。其中除两次是由于端部遗留金属物外,其他分别有以下特征。

(1) 事故大都发生在端部没有压板固定的引线或鼻端线圈处。

(2) 短路部位处于定子绕组电位较高(最高或次高处)部位。

(3) 事故发生在引线绝缘固化工艺不良,即脱壳严重的手包绝缘与模压绝缘搭接处。

(4) 事故发生在定子水电接头绝缘盒处。该处在施工时未按设计要求将模压绝缘伸进盒内,造成模压绝缘终端铜线露于绝缘盒外,而盒内环氧泥又未填满或极少。

(5) 事故大都发生在机内氢气湿度大、漏油严重或有结露的机组。

事故频繁发生的主要原因是制造质量问题。

二、负序电流烧损转子

近几年,12~300MW 发电机有数台发生过负序电流烧损转子的事故。导致转子本体、槽楔端头与齿接触处过热发蓝,转子护环与本体嵌装部位过热烧伤。更为严重者,有的发电机在上述部位有烧熔或在过热区产生了疲劳裂纹。

造成负序电流烧损转子的原因有以下几方面。

(1) 发电机相间不对称短路故障，或发电机出口断路器操作时未能使三相同时合上或断开，发电机呈现长期不对称运行状态。

(2) 继电保护接线错误，不能正确动作。开关失灵保护没有投入，使事故持续时间延长。

(3) 转子回路采用的 DM-2 型灭磁开关的性能较差，事故状态时不能快速灭磁，使发电机内部短路不能及时消除。

(4) 当发电机经受不对称运行、负序电流又很大的事故后，未及时进行检查和处理而继续运行，使事故损坏更加严重。

(5) 有的发电机转子护环与本体搭接面上有绝缘垫，使转子承受负序电流的能力下降。

三、氢冷发电机严重漏氢和漏油

当前，国产氢冷发电机运行的主要问题之一是漏氢。表 1-5 统计数字表明，由于严重漏氢造成发电机停机检修共 29 次，占总停机事故的 10.9%。其中 200MW 汽轮发电机严重漏氢 18 次，占漏氢事故的 62.1%。

漏氢的主要原因是制造、安装和检修质量不良。

我国及一些外国制造厂标准规定^[2]，24h 内的漏氢量不应超过其机壳内有效气体容积的 5%。现在，相当多的发电机不能达到规定标准。表 1-5 的统计中，Q 电厂 11 号发电机及 D_A 发电厂 1 号发电机（均为 QFQS-200-2 型，200MW）每日漏氢量分别达 235m³ 和 200m³，大约为机内气体容积的 3.2 倍和 2.74 倍。连续补氢仍然无法维持发电机在额定氢压下运行，使制氢站储氢量大幅度下降，只好被迫停机堵漏。据统计，由于严重漏氢停机少发电量占总事故少发电量的 22.9%。

漏氢的主要部位有以下几方面。

- (1) 密封瓦和密封垫。
- (2) 定子出线套管法兰。
- (3) 定子端盖结合面。
- (4) 定子线棒接头处。

氢冷发电机的另一带普遍性的故障是严重漏油。漏油对发电机运行的危害在于以下几方面。

(1) 油雾弥漫于机内，使氢气纯度降低，严重影响电机的绝缘强度。

(2) 油雾进入定子及转子通风道（或通风孔）中沉积为油垢，影响电机的散热及通风。

(3) 油雾附着于定子端部绕组上，对绕组沥青云母绝缘将起溶解浸蚀作用。

漏油的另一严重后果是将主油箱中含水的油带入发电机内将造成氢冷发电机内氢气湿度增高，对于大型发电机，会导致转子护环的应力腐蚀裂纹和降低定子端部绕组绝缘表面电气强度。

漏油严重的发电机大部为国产机组。如J电厂 QFQS-200-2 型发电机，投运初期漏油严重，每天从发电机排污管放出的油达 13.8kg。机组起动或氢气置换时漏油量更多，每次自机内能放出近 480kg 油。

漏油的原因如下。

(1) 平衡阀、压差阀调节性能不良，机组在运行中未经常监控密封油箱的油位。

(2) 内挡油盖油封梳齿、挡油板安装不良，起不到油封作用而造成漏油。

(3) 大部分仍采用氢气直接置换的机组极易出现漏油问

题。

四、直接水冷发电机漏水

直接水冷发电机的定子、转子由于漏水造成的停机事故亦较为普遍和突出。1984~1987年因漏水造成的事故停机共53次，占总事故台次的19.9%。其中转子导线引水拐角断裂有15台次；定子线棒空心导线裂纹内漏及并头套焊接质量不良而引起的漏水有15台次；定、转子绝缘引水管老化脆裂而引起的漏水有12台次；其它漏水停机事故11台次。

直接水冷发电机漏水的主要原因如下。

(1) 转子导线引水拐角在运行中除了承受离心力所引起的静应力外，还要承受转子挠度引起的交变应力，后者使拐角产生疲劳裂纹，进一步扩展后形成拐角断裂漏水。近年来制造厂将原铜拐角改为U型不锈钢三通引水接头后，抗疲劳安全系数提高了，断裂事故已基本不再发生。

(2) 定子线棒及并头套处漏水的主要原因是水电接头质量及焊接工艺不良，有裂纹和砂眼漏水。此外，定子线棒在运行中由于振动大，导致空心导线、实心导线疲劳，空心导线断裂漏水。

(3) 定子绝缘引水管老化破裂。主要原因是有些绝缘引水管的质量不稳定，使用寿命短，运行中老化破裂。如果安装时装配位置不当，使其受一定的内应力，在运行中也会断裂。

(4) 转子进水通过大轴中心孔时用的石棉盘根磨损造成漏水等。

五、运行操作失误、维护管理不善引起的事故

这种事故包括工作不负责任、操作不认真，即属于人员素质差造成的事故；执行规程不严，包括未严格执行发电机

运行的技术条件和规程而造成的直接或间接事故；工作人员误判断和误操作等。

1984~1987年期间，属于这类事故共计55台次，占总事故台次的20.7%。特别应提及的是由于误操作造成发电机失磁、进相、非同期运行、断水、短路和电网向发电机倒充电以及发电机变为电动机运行等恶性事故，都使发电机组受到不同程度的损坏。

六、其他典型事故

如直接氢冷转子绕组通风孔局部堵塞过热烧损，电刷及滑环过热、磨损，定子铁心烧损及机组转子和轴磁化等。

第三节 提高发电机运行可靠性的根本途径

以上分析表明，当前我国已运行的200~300MW大型汽轮发电机事故率是较高的。以国产200MW（水氢氢冷却方式）及300MW（定、转子直接水冷）汽轮发电机为例，投入运行已近20年时间，设计、制造质量及运行维护等问题暴露的比较多。制造厂及运行部门针对发电机运行中出现的问题，从设计、结构及工艺采取了一系列改进措施；经历数次设备完善化工作，属于设计及工艺缺陷、运行维护存在的问题等已经找出了原因和解决途径，但目前尚不能说问题已全部解决。

当前，国产发电机的主要问题仍是设计及制造工艺质量。电机制造厂应采取严格技术措施，对生产过程的每一道工序进行认真的检验，以确保产品质量，为发电机可靠运行奠定基础。

提高运行维护水平，提高机组的安装和检修质量则是降