

汽轮发电机故障检查分析及预防

李伟清 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

汽轮发电机故障检查分析及预防

李伟清 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内
容
提
要

大型发电机运行故障和事故是当前我国电力工业发展中存在的重要问题之一。一些严重事故造成了设备损坏、停电和巨大经济损失,并危及电网的安全运行。本书系统叙述了我国(及国外)近年来大型汽轮发电机发生的性质严重、影响较大,且在一定程度上有普遍性的各类事故,分析其发生原因,提出了处理方法和预防措施。对状态监测技术在大电机运行状态下的应用也作了介绍。

本书可供从事汽轮发电机设计、制造、运行、检修方面工作的工程技术人员阅读,也可供各大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮发电机故障检查分析及预防/李伟清著. —北京:
中国电力出版社, 2002
ISBN 7-5083-1048-9

I. 汽... II. 李... III. 汽轮发电机-故障检测
IV. TM311.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 037793 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http: //www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 10 月第一版 2002 年 10 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 18 印张 437 千字
印数 0001—4000 册 定价 31.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

新版前言

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及工艺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和维护,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的设计与制造质量有关;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质的事故,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,提供给电机制造部门和运行部门,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作为参考和借鉴。

本书第一版《发电机故障检查分析及预防》自1996年出版以来,由于内容较密切地结合电力生产实际,受到广大读者欢迎。但该书成稿于1990年,至今已达10年之久,其内容主要涉及200MW及以下容量的发电机。近十几年来,我国电力工业发展迅速,新装及并网运行的机组中300~600MW占大多数。这些机组10多年来发生的与制造质量以及安装、运行维护有关的故障和事故较多,对这些故障和事故的分析以及针对这些故障和事故特点应采取的新举措需进行重点补充;十几年来状态监测技术在电力系统领域的应用也在书中作了补充;此外,书中还增补了诸如汽轮发电机异常振动、超速损坏及扭振损坏、氢冷发电机氢油系统故障及集电环和电刷故障等系列内容,使全书进一步充实完整,能基本反映国内外90年代电力技术新水平。

由于书中涉及汽轮发电机的故障与事故约占90%以上,为更有针对性地反映本书的特点,新版更名为《汽轮发电机故障检查分析及预防》。

本书由一些长期从事发电机运行和试验研究的高级工程师们编写。全书共十三章。各章节的执笔顺序为:第一章,第二章第四节,第四章第一、四节,第六章,第八章,第十章第一节及第六节,第十一章第四节,第十三章的第一、二、三、五、八节由李伟清编写;第二章第一节,第四章第三节由冯复生编写;第二章第二节,第三章第一至第六节,第九章由王绍禹编写;第二章第五节,第五章第三、四节由尤儒臣编写;第二章第三节,第四章第五节由郝常骥编写;第四章第二节由阮仕荣编写;第五章第一节由张国权、白亚民编写;第五章

ABD 67/03

第二节由王国乾编写；第七章的第一、二、三、五节，第十一章的第一、二、三节由崔力编写；第七章第四节由马庆平编写；第十章第二节至第五节由张葆昌编写；第十二章由徐英杰编写；第三章第七节，第十三章第六、七节由白亚民编写；第十三章第四节由孙树敏编写。

全书由李伟清任主编。由原华北电力集团公司副总工程师、教授级高级工程师陈荣德审阅并提出许多宝贵意见，在此深表谢意！

本书在调研过程中承蒙哈尔滨电机有限公司原副总工程师张汉声、原副总工程师沈梁伟及副总设计师刘庆河，中国电能成套设备股份公司原副总工程师毛国光。浙江省电力公司高级工程师沈波及有关发电厂许多同志热情帮助，谨表诚挚谢意！

由于作者们水平所限，也由于在发电机事故调查过程中由许多因素促成的困难，疏漏、不妥之处在所难免，恳请读者批评指正！来函请寄沈阳东北电力科学研究院，邮编：110006，电子信箱：(E-mail) luckywj@163.net。

编 者

2002年6月

目 录

新版前言

第一章 绪论	1
第一节 发电机事故概况	1
第二节 发电机严重事故的典型事例	5
第三节 提高发电机运行可靠性的根本途径	9
第二章 定子绕组故障	11
第一节 定子绕组绝缘故障	11
第二节 定子绕组导线的断股	21
第三节 定子绕组的接头事故	32
第四节 水冷定子绕组堵塞和断水	38
第五节 定子绕组漏水	47
第三章 定子铁芯故障	57
第一节 片间绝缘的损坏	57
第二节 有效铁芯压装的变松	58
第三节 铁芯端部压指压偏	59
第四节 电阻温度计损坏引起有效铁芯的故障	62
第五节 绕组接地引起的定子铁芯损坏	62
第六节 定子铁芯试验	63
第七节 ELCID——定子铁芯故障探测仪的应用	67
第四章 转子绕组的常见故障	72
第一节 转子绕组的对地绝缘故障	72
第二节 转子绕组匝间短路	80
第三节 不拔护环诊断大型汽轮发电机转子绕组匝间短路位置的方法	89
第四节 转子绕组热变形	95
第五节 集电环—电刷装置的烧损	102
第五章 直接冷却转子绕组的故障	107
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	107
第二节 直接冷却转子绕组的通风检验	118
第三节 直接水冷转子绕组漏水	122

第四节	直接水冷转子绕组局部堵塞	129
第六章	负序电流引起的转子损坏	138
第一节	不对称运行对发电机的影响	138
第二节	负序电流烧损转子的实例及特征	140
第三节	发电机承受负序电流的能力	145
第四节	发电机不对称运行后的检查及处理	149
第七章	转子护环损坏及强度计算	151
第一节	转子护环事故概述	151
第二节	护环裂纹的性质、成因和机理	152
第三节	防止护环开裂的技术措施	156
第四节	汽轮发电机护环强度的计算	161
第五节	转子护环的检查和更换问题	167
第八章	转子的超速损坏和扭振损坏	172
第一节	有明显超速特征的转子损坏实例及原因分析	172
第二节	扭振导致的转子损坏	178
第三节	其他原因引起的转子损坏	180
第九章	机组磁化与退磁、轴电压及转轴的合理接地方式	184
第一节	汽轮发电机组的磁化与退磁技术	184
第二节	汽轮发电机组的轴电压及转轴的合理接地方式	202
第十章	发电机的振动	206
第一节	振动的原因和类型	206
第二节	转子匝间短路引起的振动	208
第三节	气隙不均匀和电磁谐振引起的电磁振动	210
第四节	转子中心位置偏移引起的振动增大	212
第五节	不对称负荷引起的电磁振动及转子热不平衡引起的振动	213
第六节	大型汽轮发电机转子异常振动实例分析及清除	214
第十一章	氢、油及辅助系统故障	220
第一节	氢控系统故障	220
第二节	轴封油系统故障	232
第三节	机内氢气湿度超标的主要原因及解决措施	241
第四节	气体冷却器的故障	245
第十二章	氢冷发电机漏氢和氢气爆炸	249
第一节	氢气爆炸事故及预防	249
第二节	氢冷发电机漏氢	251
第三节	漏氢量检测及计算	253

第十三章 大型发电机的运行监测和诊断	258
第一节 实现运行监测和诊断的重要性	258
第二节 定子绕组绝缘监测	259
第三节 发电机局部过热监测及诊断	262
第四节 定子绕组端部振动监测系统	263
第五节 转子绕组匝间短路监测	265
第六节 氢冷发电机漏氢监测	266
第七节 发电机冷却气体湿度监测	269
第八节 汽轮发电机组轴扭振监测	272
参考文献	276

第一章



绪 论

随着国民经济的持续发展,我国电力工业正处于大电网与大机组的发展阶段。至 2000 年末,即我国第九个国民经济发展计划(1996~2000 年)胜利完成为止,全国发电机总装机容量已达 3.1932 亿 kW,其中火电 2.3754 亿 kW,水电 0.7935 亿 kW;全国总发电量 13685 亿 kWh,其中火电 11079 亿 kWh,水电 2431 亿 kWh。我国发电设备总装机容量及发电量均居世界第二位。全国百万千瓦及以上的水、火、核发电厂已达 85 余座。在全国总装机容量中,100MW 及以上火电机组 782 台,共 168711MW,占火电总装机容量的 71.02%;全国 40MW 及以上的水电机组共 337 台,46230MW,约占水电总装机容量的 58.26%。目前,全国已并网运行的发电机单机最大容量为 983.8MW。200、300、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的发展需要相适应,在发展电力工业的同时,进一步提高发电机组设计制造水平和质量,提高安装和运行管理水平,使发电机组达到安全、可靠、满发,是一项首要任务。

最近 20 多年来,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 200~600MW 发电机组考核试验结果表明,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。大型发电机组的设计及制造水平正按相应的国家标准向世界先进水平靠拢。资料统计,自 1993~1997 年,国产 200MW 机组的等效可用系数(EAF)由 84.45%提高至 88.71%;300MW 机组由 76.47%提高至 86.86%。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),发电机的事故率是最低的。

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。突出表现在发电机各类事故中,涉及制造工艺和质量原因所占比重最大;此外,运行管理水平,机组安装及检修质量也存在不少问题,以至近十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。如困扰整个电网的近 10 年之久的国产 200MW 汽轮发电机组频繁发生的定子绕组端部短路事故,严重烧损定子绕组和铁芯;国产 200 及 300MW 汽轮发电机(包括部分进口 600MW 汽轮发电机)较多发生的内冷定子绕组堵、漏、振造成的严重损坏;发电机非全相运行,负序电流烧损转子;发电机组异常振动及严重超速等恶性事故而损毁整台机组;以及氢冷发电机普遍存在的漏氢漏油、氢气湿度大等诸多问题。造成设备局部或全部损坏、长期停机、发电经济损失严重。

第一节 发电机事故概况

以下是我国历年来发电机事故率统计概况。由于在一些特殊时期统计工作的间断和对事

故调查了解遇到的困难，以及 1987 年以后国内总的发电机事故率统计工作的中断，只能列举一些阶段性的、局部的事故统计材料，仅供参考。

表 1-1 系 1959~1987 年间我国发电机事故率（台次/100 台）统计。表 1-1 表明，1971 年发电机的事故率是历年中最高的。这与 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，近几年来发电机事故率有上升趋势。特别引以注意的是 100~200MW 及以上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 1-1 1959~1987 年间我国发电机事故率统计 台次/100 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
1971	89	9.23	1982	48	2.77
1972	50	4.82	1983	46	2.57
1973	50	4.34	1984	25	1.38
1974	67	5.46	1985	43	2.28
1975	52	4.22	1986	97	4.83
1976	45	3.50	1987	101	4.92

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 台次

年 份	事 故 台 次						累计台次
	300MW 及以上	200~299MW	125~199MW	100~124MW	50~99MW	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 台次

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 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 台次

年 份	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	定子铁芯烧伤		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
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
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

90年代以来,国产300MW汽轮发电机发生的各类事故及故障亦较多,尤其是定子内冷水系统的堵水、断水及漏水事故最为突出;其次是定子绕组端部松动及磨损引发的相间短路事故。表1-7系1993~1995年国产300MW汽轮发电机本体事故概况表。虽只占发电机事故总数的38.4%,但停机时间却占总数的80%以上。

还应指出,90年代初我国陆续并网发电的18台600MW汽轮发电机组(包括9台进口发电机),属于发电机本体事故竟达10台次之多,其主要原因是设计及制造质量问题,严重者如国产QFSN-600-2YH型发电机在运行中转子励磁引线固定螺栓头断裂引起的定转子严重损

坏事故；自法国进口的 GEC-ASLTHOM 公司 3 台容量 677MW 先后发生的定子铁芯端部通风设计不良和工艺问题引起的定子绕组接地和铁芯局部过热融化事故；由于定子端部引线支撑结构设计不良，运行中引线严重振动造成定子单相接地及短路故障等。

表 1-7 1993 ~ 1995 年 300MW 发电机本体事故与故障概况

占事故总台次的百分比 (%)	事故及故障原因	事故次数
定子 74%	发电机定子内冷水系统问题 (断水、堵塞、引水管破裂等)	29
	定子绕组空心导线漏水	4
	定子端部绕组存在有异物	1
	定子绕组端部松动、磨损	4
	定子绕组绝缘不良	2
转子 16.7%	转子绕组空心导线及绝缘引水管漏水	7
	转子绕组严重匝间短路	2
其他 9.3%	其他	

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

1983 ~ 1992 年的 10 年间，在 14 台国产 QFSN-200-2 型及 QFQS-200-2 型 200MW 氢冷发电机上共发生过 19 台次定子绕组相间短路事故，造成定子线棒严重烧损并波及铁芯损伤。其中除 4 次是由于端部留有金属异物外，其他分别有以下特征：

(1) 事故大都发生在投运不到 2 年的发电机上，运行不到 1 年即发生事故者 9 台次（最短者不到 1 个月），占事故总台次的 47.4%；2 年及以上 6 台次，占事故总台次的 31.6%。其余 1 ~ 2 年者 4 台次，占 21%。

(2) 事故大都发生在定子端部绕组没有压板固定的鼻端线圈或引线处。

(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，而盒内环氧泥又未充满或极少。

(5) 短路部位处于定子绕组电位较高（最高或次高）部位。

(6) 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工艺质量问题。

据不完全统计，1993 ~ 1995 年，国产 300MW 发电机有 6 台次因定子端部线棒固定绑扎不良、水电接头绝缘盒制造质量不良等原因引发了相间短路事故。

二、直接水冷发电机漏水

直接水冷发电机定子、转子绕组由于漏水造成的停机事故自 70 年代以来一直较为普遍和突出。根据表 1-5 统计结果，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%。其中定子线棒空心导线有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；转子导线引水拐角断裂有 15 台次；其他漏水停机事故 11 台次。

制造及运行部门根据以上事故原因作了大量改进工作后,进入 90 年代发电机定、转子漏水停机事故明显减少了,但问题仍未解决。根据我国某电网 1988~1998 年对 50MW 及以上发电机故障统计资料,由定子及转子渗漏水引发的事故及故障共 18 台次,占总台次的 26.4%。由表 1-7 可知,自 1993~1995 年国产 300MW 发电机共发生 4 台次定子空心铜线破裂漏水事故及 5 台次转子引水管破裂漏水事故,占发电机本体事故的 16.7%。

值得提出的是,我国自 GEC 公司进口的一台 983.8MW 4 极核电机组,也因制造质量问题发生过定子端部线棒漏水故障。

直接水冷发电机漏水的主要原因如下:

(1) 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,有裂纹及砂眼而漏水。此外,定子线棒端部固定结构不良,固有频率接近于 2 倍工频,由于在运行中振动大,导致空心导线、实心导线疲劳,空心导线断裂漏水。

(2) 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。如果在安装时装配位置不当,使其受一定的内应力,在运行中也易断裂。

(3) 转子绕组引水导线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。近年来制造厂已将原来的铜拐角改为 U 型不锈钢三通引水接头,抗疲劳安全系数提高了,已使原来频繁发生的拐角断裂漏水事故基本不再发生。

三、定子内冷水回路堵塞及断水

定子内冷水系统的堵塞及断水事故自 1970 年以来即在一些国产 125MW 及 200MW 汽轮发电机上屡次发生过。造成定子线棒严重过热烧损。如 1970 年以来在 200MW 发电机上发生过的因定子水路法兰橡皮垫龟裂及定子水接头铜垫圈进入水回路引起堵塞。以后制造厂在定子进水管路法兰连接处用其他材料代替了橡皮垫;对定子水接头用提高加工精度的办法取消了铜垫圈,使此问题基本得到了解决。125MW 发电机上曾发生过定子空心铜线氧化结垢后堵塞内冷孔,对此,制造厂将绕组采用独立的密闭循环水系统并通过旁路 10% 水流过离子树脂处理装置,使水的导电率保持在 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{S}/\text{cm}$,解决了水质引起的结垢堵塞。

近年来,300MW 发电机定子水路发生的堵塞、断水事故率仍较高。如 1993~1995 年 3 年间发生的堵塞、断水事故共 29 次(见表 1-7),占发电机本体事故总台次的 59%,远高于其他原因引发的事故。事故发生的主要原因是电机制造,现场安装及大修试验后将异物遗留在连接回路内;过滤网破裂或清理不及时,杂物进入水回路。pH 值控制不严造成的空心铜导线结垢堵塞事故仍有发生。

发电机定子内冷水回路断水或堵塞均会导致定子线棒过热烧损及水回路放电烧损。线棒铜线严重过热烧熔时,往往波及定子铁芯。

还应提及,一台国产 QFSN-600-2 型 600MW 发电机近期发生过定子绕组端部连接线(弓形引线)过热烧损现象。经分析认为,该机具有“气堵”烧损的特征。因而对于定子水冷的大容量汽轮发电机在各种运行条件下,如进出水压差、起动充水前的排气进行的不充分足以引起“气堵”的问题值得提出进行研究。

四、定子绕组端部振动大、松动磨损造成的相间短路和接地事故

国产 200MW、300MW 系列发电机曾多次发生过定子绕组端部固定结构及工艺不良,运

行中振动大引发的线棒与固定部件松动、磨损，鼻部空心导线漏水，造成接地和相间短路。国产 200MW 发电机自 1983 ~ 1992 年 10 年间发生的 19 台次相间短路事故中有相当一部分与定子绕组端部固定结构不良直接有关。某电厂一台 QFN-300-2 型氢冷 300MW 汽轮发电机运行 6 年后，在 4 个月内连续两次发生定子相间短路事故，经检查，定子端部线棒并头套多处被烧断、通风管及股线多处烧熔。经分析认定，事故原因是定子绕组端部固定结构不良，特别是鼻部整体性差、运行中振动过大、导致上下层线棒电连接导线疲劳断裂，引起电弧烧损。此外，通风管振动使绝缘磨损引起环流，造成通风管裸露更加重了事故的破坏程度。

前面提到的，我国自法国 GEC-ALSTHOM 公司进口的三台 660MW 汽轮发电机由于定子引线支撑结构设计不良，引线的自振频率没有避开 100Hz 附近的共振范围；固定引线的玻璃布棒自身刚度较差，不能抑制引线在电动力作用下所引起的振动，运行中发生共振，造成多层连接盒下部与引线的焊接部位开裂，引线烧断漏水，导致发生了定子单相短路和接地事故。

我国自俄罗斯进口的一台 TBB-500-2EKY3 型 500MW 汽轮发电机累计运行不到 15000h，定子绕组端部励侧即因制造质量原因导致端部固定件（绑环间的撑块）松动，掉落至绕组背部，磨穿绕组主绝缘、磨掉底层实心铜线进而磨穿空心铜线造成漏氢事故。经检查，端部绕组磨损严重且是大面积的，其中有 9 只线圈被磨坏，检查处的磨点数 20 余处，磨坑深度严重者达 6 ~ 6.5mm。绑环间的撑块（最严重者为第一环与第二环之间）松、活、脱落者占 90% 以上。由于定子端部损坏严重，最后由国内制造厂对定子端部做了整体改造，更换了全部上层线棒及部分下层线棒。

近期，另一电厂对一台 TBB-500-2EKY3 型 500MW 发电机定子检查后发现，端部两侧均有大量黄粉出现，具有明显的磨损特征，电厂已对发电机端部结构进行改造和处理。

五、负序电流烧转子

近十几年来，100MW ~ 600MW 发电机曾有多台发生过负序电流烧损转子事故。导致转子本体、槽楔端头与齿接触处过热发蓝或局部烧熔，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后的熔焊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个方面。

(1) 发电机相间不对称短路事故，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) 转子阻尼系统的结构设计及规定的承受负序电流的能力不相适应。后者数值偏大。

(6) 转子承受负序电流的能力与齿及槽楔装配松紧程度或是否良好接触有关，亦即与装配工艺有关。

六、氢冷发电机的严重漏氢和漏油

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，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。Q 电厂 11 号发电机及 DA 发电厂 1 号发电机（均为 QFQS-200-2 型，200MW）每日漏氢量分别达 235m^3 和 200m^3 ，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) 定子上下半端盖结合面；端盖与端罩结合面。
- (4) 定子线棒接头处；氢气漏入定子内冷水系统等等。

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) 含水油雾弥漫于机内，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的绕组上，对绕组沥青云母绝缘将起溶解侵蚀作用。

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，会导致转子护环产生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。

七、运行操作失误、维护管理不善引起的事故

这类事故包括工作责任心不强、操作不认真、技术水平及经验不够等，即属于人员素质差造成的事故；执行有关规程不严，包括未严格执行发电机检修试验有关标准、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。

1984~1987 年期间，属于这类事故共计 55 台次，占总事故的 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。

近年来，由于维护管理水平的不断提高和完善，这类事故已明显减少，但仍不可掉以轻心。最近某电厂发生的一台 200MW 汽轮发电机在起机过程中严重超速导致了发电机转子断轴全毁恶性事故的重要原因之一即与运行操作失误有关。300MW 发电机也多次发生过非同

期合闸及非全相运行故障及事故。

八、其他典型事故

如直接氢冷转子绕组通风孔局部堵塞；转子绕组匝间短路引发的接地故障和机组大轴磁化；定子铁芯烧损；电刷及滑环过热、磨损以及发电机轴承断油转子轴颈烧损事故等。

第三节 提高发电机运行可靠性的根本途径

从以上典型事故分析表明，当前我国已运行的 200~600MW 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，投入运行的最初 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、运行维护存在的诸多问题已经找出了原因和解决途径。目前，上面提到的 200MW、300MW 机型产品，质量已趋稳定，但国产 300MW（水氢氢冷却方式）及 600MW 发电机，产品质量仍暴露出不少问题。

当前，国产发电机的主要问题仍是设计及工艺质量。制造厂应采取严格和行之有效的产品质量保证措施。提高各级人员的产品质量意识；对生产过程的每一道工序，每一个部件进行严格认真的检验，以确保产品质量，为发电机可靠运行奠定基础。

关于国外进口的大型汽轮发电机的产品质量，总的来说优于国内产品，但也暴露出不少问题。设备质量可谓优劣各半、参差不齐。作者认为，有关部门应认真听取意见，汲取教训，慎重做好选型和监造工作。还应提及，对以引进技术制造的发电设备，先进性、合理性应该肯定；但从有的发电机运行后暴露出的问题来看，不仅涉及对引进技术的消化吸收及合理利用，在制造工艺上也存在不少不完善的薄弱环节。此外，对于一些关键性的技术问题，尚需多做一些基础研究试验工作。

提高运行维护水平，提高机组的安装和检修质量则是降低发电机事故率，提高其运行可靠性的另一重要方面。特别应提出的是，对大型发电机组的技术条件和运行要求应树立明确概念：发电机运行中的各种工况参数，如冷却气体温度、湿度、冷却水温及其差异、机组的起停条件及非正常运行条件等有比中小型电机有更加严格的要求和规定。长期达不到这些要求和规定将降低发电机运行可靠性甚至立即使发电机遭到损伤。在国外及国内，已提供了不少这样的事例和经验。我国的安装、检修和运行维护水平必须按照相关的国家标准和技术标准规定，贯彻实施，以期与当前大电机运行要求相适应。

还应提及，过去运行部门对发电机制造过程中的监造及相关的试验验收一直是工作中的薄弱环节，以至在制造过程中存在的缺陷和隐患不能及时发现和消除。建议对于进口及国产发电机组应加大监造力度，选派有技术水平、有经验和责任心强的专业技术人员始终参与设备选型、技术谈判及监造工作。严格进行验收考核试验工作。

总之，提高发电机运行可靠性，保证发电机安全满发的根本途径首先是提高产品（包括配套设备）质量，其次是提高运行维护及安装检修水平。此外，发展旨在及早发现发电机运行中存在的潜伏性故障，防止突发性事故发生，减少事故损失的在线监测和诊断的技术装备亦是十分必要的。当前，国内已研制出发电机局部放电监测、定子绕组端部振动监测、转子绕组匝间短路监测、漏氢及氢湿度监测、以及氢冷发电机过热报警装置等，有的已投入运行