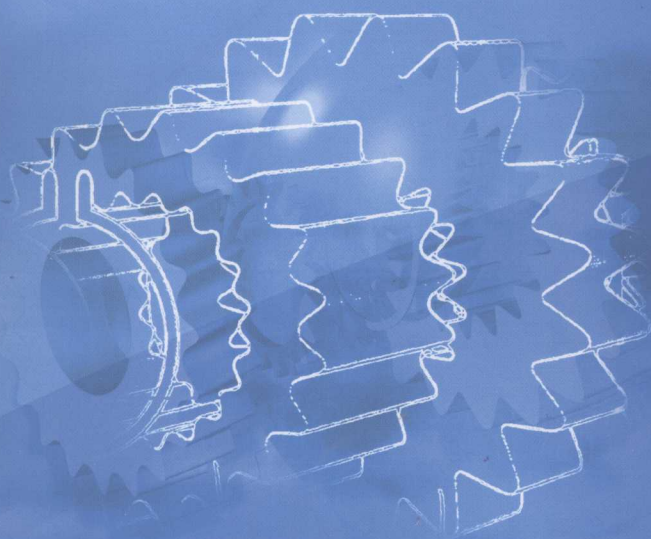


卧式蒸发冷却电机定子的 绝缘与传热

栾 茹 著



科学出版社
www.sciencep.com

北京建筑工程学院学术著作出版基金资助出版

卧式蒸发冷却电机定子的 绝缘与传热

栾 茹 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍卧式蒸发冷却电机的定子,详细阐述了卧式蒸发冷却电机定子气、液、固三相绝缘、传热系统的形成机理,通过对其进行合理设计和优化,可以研制出针对不同使用需要,或者对应不同系列的、具备较高综合性能指标(可靠性、安全性、效率、材料利用率等)的新型卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构。

本书可供电机制造企业、国内电站和船用等高功率密度特种电机的工程技术人员等使用,也可作为电气工程专业的各高等院校、研究机构的教师、研究人员、研究生等的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卧式蒸发冷却电机定子的绝缘与传热/栾茹著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-022951-9

I. 卧… II. 栾… III. ①蒸发冷却发电机-定子-绝缘②蒸发冷却发电机-定子-传热 IV. TM311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 138913 号

责任编辑:周 炜 王向珍 / 责任校对:赵燕珍

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:1—2 000 字数:217 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

序

我国蒸发冷却技术和双水内冷技术的研究工作差不多是同时在中华人民共和国建国初期开始的。当时的主导思想是希望采用最新的冷却方式满足我国增大单机容量的需要,使我国的汽轮发电机制造业在国际上占有领先的地位。20世纪50年代中后期,双水内冷技术发展较快,125MW已形成系列产品,300MW汽轮发电机上也已经采用此项技术。随着氢冷气隙抽气技术的发展,以及后来超导体励磁绕组发电机的研究,这些技术被认为是发电机的未来技术。因此,蒸发冷却技术一般被认为是没有必要发展也没有发展前途的冷却技术。正是在这种困难条件下,有一批默默无闻的同志在十分艰难的处境下坚持研究、制造和试验,使这一技术日臻完善。

过去冷却方式的改进主要是为了提高单机容量,所以只是在必须增大单机容量的条件下才想到需要发展一种新的冷却方式。现在新的冷却方式的研究和应用应以提高发电机运行可靠性和综合经济指标为主要目标。很多先进的电机制造厂都对提高可维修性倾注了极大的关注,以达到延长检修周期,甚至达到基本免维修或缩短检修时间的目的,从而获得更高的经济效益。

蒸发冷却技术的研究和应用也出于同样的目的,目前正在已研制出的机组上实现着上述目标。蒸发冷却系统在利用液态介质汽化过程中吸收潜热进行冷却的同时,还充分利用了蒸发冷却介质本身具备的较好的绝缘性能。从提高电机可靠性方面考虑,蒸发冷却有可能成为一种新的冷却方式。

经过多年的实践,蒸发冷却技术充分展现了其在发电机及其他电机电器上的可行性和发展前途。人们一致认为,大型汽轮发电机定子全浸式蒸发冷却方式,在制造技术上是可行的,在制造和运行的综合经济上也会带来很大的效益。如果对全浸式定子绝缘结构做进一步的开发研究,有可能大大减薄甚至取消以云母为基础的线棒绝缘,使铜线的槽满率有所提高,导线的冷却条件进一步改善,收到更大的经济效益。

蒸发冷却技术发展至今,人们对此技术积累了丰富的研究经验,有必要向社会介绍这项技术的学术水平与价值。蒸发冷却技术涉及多方面的学科内容,绝缘结构仅仅是其中的一个部分,已经做过的试验受科研环境与条件的限制,数据还不完整,系统性还不够,尚有很多工作等待科技人员去做,书中介绍的内容还只能供设计或研究人员参考。

顾国彪

2008年10月

前 言

伴随着卧式电机容量的提高,冷却方式经历了空冷、氢外冷、氢内冷、水内冷等发展阶段。空冷电机存在温升高、效率低的弊端;氢冷电机若结构密封差会由于氢气内混入少量的空气而引起爆炸;水冷电机的空心铜线破裂漏水会引发定子绝缘破坏而导致事故性停机。由于存在以上种种缺陷,电机业特别期望能研究出一种避免这些弊端的新型冷却方式。蒸发冷却应运而生,它利用的是液体介质蒸发时所能吸收的热量要比“比热”大得多这一物理现象,蒸发冷却的研制成功,是继空冷、氢冷、水冷之后出现的又一种重要的中大型电机的冷却方式,它具有安全可靠,技术、效益优异,性能稳定,运行管理简便的特点。

蒸发冷却是由我国独创的一种新型的冷却技术,国外仅在 20 世纪 50 年代对此进行了粗浅的研究,没有取得实质性研究成果。对于卧式蒸发冷却电机的原理、绝缘技术,国内还没有专门的研究资料记载,尽管该新型电机目前仍处于工业性样机试制阶段,还没有实现真正的产业化,但已经投入运行的机组呈现出的突出业绩,赢得了国内外电机行业人士的密切关注和国内电站业主的高度评价,因此有必要在电机行业内撰写一本详尽介绍卧式蒸发冷却电机主要技术的专著。本书与已出版的同类书籍相比,在内容上,主要侧重介绍采用蒸发冷却技术的卧式电机,包括电机的冷却原理、运行原理及与之相关的绝缘、传热技术;在理论上,阐述了解决卧式蒸发冷却电机定子密封腔体内形成的气、液、固三相绝缘系统的电磁场的仿真计算问题,以及电磁场与温度场耦合后的仿真计算问题,这在学术上尚属首次,为定子绝缘结构的设计提供了理论基础。

卧式蒸发冷却电机设计成功的关键是要解决好定子绝缘问题,这种新型电机必须采用浸润式蒸发冷却方式,但却与传统常规定子绝缘结构发生严重冲突,不能沿用已经取得实效的传统电机的定子绝缘结构设计与技术路线。本书所阐述的新型、适合于蒸发冷却环境的、可靠可行的定子绝缘结构的原理、设计过程、关键技术等是决定卧式蒸发冷却电机继续发展下去的主要技术之一。

本书首先阐明冷却方式对于电机的重要性和蒸发冷却技术的研究基础及发展历程;其次阐述卧式蒸发冷却电机的结构、运行过程与特点,进而引出该类型电机的定子密封腔体内形成的一种气、液、固三相绝缘、传热系统;然后叙述与这一新型绝缘、传热系统相关的关键技术和主要问题;再以两种卧式电机为例详尽论述电机绝缘结构的优化设计过程;最后阐述蒸发冷却卧式电机定子绝缘的特点与规律,温度分布的特点与规律等,并将其应用于更大容量的汽轮发电机上。本书的主要内容系出自作者在中国科学院电工研究所做博士课题期间的研究成果,作者师从顾国彪院士,本书是在顾院士的精心指导与严格要求下完成的。导师渊博的知识、严谨的治学态度、勤恳的工作作风、灵活的研究方法、积极乐观的处世精神、真诚的人格风范,留给作者深刻的启迪与影响,使作者对科学研究、人生价值等重大问题的观念进行了重新的调整与定位。师恩深厚,终生难忘。在此,向顾国彪院士致以崇高的敬意和衷心的感谢!中国科学院电工研究所的高级工程师傅德平是本书试

验研究部分的合作者,对本书中的试验工作倾注了大量精力,并给予了认真指导和帮助。本书的完成离不开他的鼎力相助。在此,作者谨向傅德平高级工程师致以衷心的感谢!本书的第2、3章内容主要是总结从事蒸发冷却研究工作的前辈的研究成果,他们包括曾在中国科学院电工研究所奋斗过的科研人员陈振斌、李作之、廖少葆、周建平等,还有现在在任的顾国彪院士。没有他们打下的研究基础,本书将成为无源之水、无本之木。在本书问世之际,特向这些前辈表示深深的敬意和诚挚的谢意。本书13.2节的计算是由中国科学院电工研究所副研究员国建鸿同志完成的,她为充实书中的内容、提升研究水平做出了很大的贡献。本书13.1节的内容由上海汽轮发电机的工程技术人员提供,并得到了他们的大力支持,另外本书在撰写过程中引用和参考了大量文献,在此对这些作者表示真诚的谢意。本书还得到北京建筑工程学院博士启动基金的资助。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏及不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 卧式电机历史简介	1
1.2 卧式电机的定义	3
1.3 卧式电机的冷却方式	3
参考文献	5
第 2 章 卧式蒸发冷却电机的研究基础	6
2.1 常规定子绝缘结构对卧式蒸发冷却电机的限制	6
2.2 蒸发冷却介质简介	7
2.3 蒸发冷却定子绕组直线部分的绝缘与传热	8
2.4 1200kV·A 全浸式自循环蒸发冷却汽轮发电机的研制及运行	10
2.5 几种蒸发冷却电机定子绝缘结构方案的模拟试验及结论	14
2.6 定子绝缘材料的表面闪络试验	22
2.7 补充试验	25
2.8 本章小结	27
参考文献	28
第 3 章 50MW 蒸发冷却汽轮发电机的研制	29
3.1 卧式电机蒸发冷却技术方案的比较	29
3.2 蒸发冷却技术对 50MW 汽轮发电机的改造	32
3.3 机组运行的效果	33
参考文献	34
第 4 章 卧式蒸发冷却电机定子绝缘体系及其传热的分析	35
4.1 卧式蒸发冷却电机定子绝缘与传热系统的组成	35
4.2 复合式绝缘系统的电场分布特点	36
4.3 卧式蒸发冷却定子的传热规律	38
4.4 卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构的设计原则	39
4.5 本章小结	41
参考文献	41
第 5 章 高功率密度卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构的初步设计	42
5.1 高功率密度卧式电机概述	42
5.2 设计新型的定子绝缘结构	43
5.3 计算模型的仿真工具	51

5.4	初步设计的绝缘结构电场计算与仿真过程	52
5.5	初步设计的绝缘结构温度场计算与仿真过程	57
5.6	初步设计的绝缘结构仿真结果中存在的问题及说明	60
5.7	本章小结	60
	参考文献	61
第6章	狭窄空间内蒸发冷却介质的沸腾换热系数的研究	62
6.1	引言	62
6.2	沸腾换热关联式	63
6.3	浸润式蒸发冷却中微小温差的测量	63
6.4	狭窄空间内蒸发冷却介质(F-113)沸腾换热系数的试验研究	68
6.5	本章小结	74
	参考文献	75
第7章	高功率密度卧式蒸发冷却电机定子绝缘确定性结构的试验研究	76
7.1	引言	76
7.2	试验中的定子模拟结构	76
7.3	传热及耐压试验装置	77
7.4	试验过程	78
7.5	试验结果及分析	78
7.6	试验结论	79
7.7	本章小结	79
	参考文献	79
第8章	新型蒸发冷却定子绝缘结构中三维温度场的仿真计算	80
8.1	引言	80
8.2	定子最热段三维温度场的仿真计算模型	80
8.3	计算定子中的热源分布	82
8.4	表面沸腾换热系数和等效热传导系数的确定	85
8.5	三种定子绝缘结构温度场的仿真结果及分析	87
8.6	高功率密度卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构的研究结论	91
8.7	本章小结	92
	参考文献	92
第9章	高功率密度卧式蒸发冷却电机试运行的温升试验	94
9.1	蒸发冷却样机定子实际运行的温度分布	94
9.2	蒸发冷却样机大功率器件的冷却与实际温度分布	97
	参考文献	98
第10章	135MW 蒸发冷却汽轮发电机定子 VPI 主绝缘厚度减薄的试验研究	99
10.1	引言	99
10.2	问题的提出及解决的技术原理	99
10.3	新绝缘结构及规范的试验研究内容	100

10.4 试验研究结论	105
10.5 本章小结	106
参考文献	106
第 11 章 高压电机定子绝缘结构的优化设计	108
11.1 引言	108
11.2 优化设计的目标及路径	108
11.3 新型定子绝缘结构电场分布仿真的原理	108
11.4 定子槽内的电场分布的计算模型	109
11.5 蒸发冷却定子槽内电场分布规律	109
11.6 本章小结	115
参考文献	115
第 12 章 24kV 等级及以上蒸发冷却汽轮发电机定子绝缘结构的可行性研究	116
12.1 引言	116
12.2 24kV 蒸发冷却汽轮发电机定子绝缘结构的试验研究	119
12.3 24kV 蒸发冷却汽轮发电机定子绝缘结构的电场仿真研究	122
12.4 新型定子绝缘结构的电场仿真研究结论	129
12.5 本章小结	130
参考文献	130
第 13 章 330MW 大型蒸发冷却汽轮发电机定子绝缘结构的研究	131
13.1 330MW 大型汽轮发电机冷却方案改造的比较	131
13.2 强迫循环蒸发冷却定子绕组内冷的温升计算	134
13.3 330MW 汽轮发电机采用全浸式蒸发冷却方案的可行性	140
参考文献	147
第 14 章 结束语	148
14.1 主要结论	148
14.2 讨论	150
附录	151

第 1 章 绪 论

1.1 卧式电机历史简介

翻开电机百年的发展史,展现在大家面前的是一个不断认识和克服传统结构设计和工艺上的限制,在技术上推陈出新的创造性过程。从 19 世纪末第一台 $100\text{kV}\cdot\text{A}$ 空冷汽轮发电机隐极型转子问世,到 20 世纪 40 年代空冷电机的制造技术趋于成熟,人们发现当容量超过 60MW 后,利用当时的空冷电机结构不仅温升高,而且效率低,所以, 100MW 级的空冷汽轮发电机很快被后来居上的氢冷系列电机所取代。

同样是为了突破容量提高所带来的发热严重、材料利用率降低等结构设计与工艺上的局限性,20 世纪 50 年代出现了氢气直接冷却技术,五六十年代水内冷技术发展成熟,这些都被认为是汽轮发电机技术一系列革新的几个划时代的里程碑^[1,2]。然而,最近 30 年虽然是大型电机系列化发展的主要阶段, $200\sim 300\text{MW}$ 汽轮发电机的安全运行问题却一直困扰着国内外的厂家和发电厂业主。据国内的不完全统计^[3~7],1983~1995 年,在 20 台 200MW 国产汽轮发电机中,共发生了 24 台次的发电机定子绕组短路事故,铜线的焊接工艺差,材料选择不适宜,导致内冷水泄露,降低了线棒主绝缘末端的绝缘水平而击穿短路;容量为 300MW 及以上的发电机(包括不同冷却方式的汽轮发电机、水轮发电机),定子内冷系统的结构性事故与故障较为突出,包括氢冷的结构密封差引起的爆炸,水冷的空心铜线破裂漏水引发的绝缘故障等,占事故性停机的 54.7% ,一些事故还危及电厂中的其他设备,破坏性较大。

鉴于汽轮发电机采用水冷和氢冷所固有的结构上的隐患,20 世纪 80 年代末,世界发电设备市场出现了一个新的发展趋势: $100\sim 200\text{MW}$ 空冷发电机的订货空前增长,1990 年达到了 1980 年的五倍^[8,9],2000 年 ABB 公司甚至推出了 500MW 空冷汽轮发电机产品^[10],更加剧了这一趋势。造成这一局面的首要原因是国家电力的增长是以大机组的安全可靠性为前提的,新型空冷机组以其安全可靠、简单、易于维护的冷却系统结构在一定程度上弥补了氢冷、水冷机组结构的不足。电机制造业正是经过了这一段打破原有结构中不合理束缚的发展历程,才成就了当今世界强大而稳定的电力工业格局。也正是在不断探索,采用新的冷却介质、新材料、新工艺以增大单机容量的电机发展过程中,一种起初不被看好,却具备相当发展优势的新型冷却方式的电机悄然而稳步地成长壮大起来,这就是本书要专门介绍的新型卧式电机——蒸发冷却电机。

中国科学院电工研究所独立自主、坚持不懈地开创了蒸发冷却大型电力设备的新型冷却技术。从理论基础性公式推导与修正到大量相关性试验的反复论证,都进行了充分必要而扎实的技术储备。自 20 世纪 70 年代以来,中国科学院电工研究所与我国产业部门合作,先后研制成功 1.2MW 、 50MW 蒸发冷却汽轮发电机和 10MW 、 50MW 、 400MW

蒸发冷却水轮发电机,以及试验室自用的蒸发冷却变压器。经多年运行证明,各台机组均呈现出安全可靠,技术、效益优异,性能稳定,运行管理简便的特点,特别突出的是各台电机的定子绕组温升低且分布均匀,以出色业绩赢得了国内电机界和电站业主的高度评价。从而奠定了蒸发冷却的基础地位,它是继空冷、氢冷、水冷之后的又一种更为先进的大型电力设备冷却方式。与水轮发电机相比,汽轮发电机采用蒸发冷却技术相对发展得比较迟缓,其主要原因是定子绝缘的结构问题^[1,11]。在汽轮发电机上采用与水轮发电机相同的管道内冷式蒸发冷却有以下两个缺点:①定子线棒虽属于集中式发热部件,但大量的电机内金属部件在交变电磁场作用下均要产生损耗,仅依靠集中式散热方式(即管内冷)难以带走全部的损耗热量,特别是对于采用常规绝缘结构的汽轮发电机定子,单位热负荷远高于同等容量的水轮发电机(低速同步电机体积大、散热面也大)

$$A = C_1 \left(\frac{S_N}{2p} \right)^{0.118} \times 10^2 \quad (1.1)$$

$$I_s = C_2 \left(\frac{S_N}{2p} \right)^{0.118} \quad (1.2)$$

式(1.1)、式(1.2)分别为电机的电负荷 A 、核算槽电流 I_s 的计算式,在同等容量 S_N 下两式都随极对数(p)的增加而减小,而汽轮发电机通常转速高、极对数小于水轮发电机的极对数,这两个参数直接反映了电机的发热状况。所以,采用管道内蒸发冷却,汽轮发电机的效果大大低于水轮发电机的。②汽轮发电机为卧式结构,定子线棒横放在槽内,若采用管道内冷式蒸发冷却,则管内蒸发流动的气、液两相流阻远大于竖直放置的水轮发电机定子线棒内管道的流阻,难以实现自循环,需要大功率的液泵打压,或增加其他的调节气、液两相蒸发冷却介质压强的设施,使电机定子的冷却系统结构复杂化,削弱了蒸发冷却的优势。可见,卧式蒸发冷却电机不能沿用已经取得实效的蒸发冷却水轮发电机的定子内冷结构,必须选择采用浸润式蒸发冷却方式的发展方向。但是,浸润式蒸发冷却技术的实现,同样与常规定子绝缘结构发生严重冲突。沿用常规绝缘结构的定子绕组犹如在穿着棉袄吹凉,外表温度正常,体内却高烧不止,其间的温差可达50~80℃,极大地限制了汽轮发电机容量或其他特种电机功率密度的提高。为此,打破传统结构设计与工艺的“瓶颈”制约,研究新型的、适合于蒸发冷却环境的、可靠可行的定子绝缘结构,是卧式蒸发冷却电机继续发展下去的当务之急。

一个国家或地区的经济发展水平与其电能的生产能力与质量密切相关,而人均装机容量代表了国家或地区的电力发展水平。我国1956年前的汽轮发电机全部是进口的,从1956年开始,逐步形成自制汽轮发电机的工业生产体系,基本上可分为引进东欧制造技术、自行研制、引进西方制造技术、优化设计四个阶段。进口的产品或技术,不仅投入大、国产化周期长^[12],而且关键是为国外更新换代前的产品或技术,我们总在模仿别人而无法超越领先。为了缓解国内近年来电力供应紧张的局面,火电机组日趋向大容量、高参数方向发展,300~900MW汽轮发电机已成为国内各大火电站的主力机组,而某些引进的产品或技术与我国的实际应用条件不符,如美国西屋公司转让的300MW、600MW汽轮发电机,强行励磁顶值电压达不到我国部分电网用户所需的两倍额定励磁电压要求。在发电机技术转让合同上,我国已提及开发300MW水氢冷汽轮发电机,可是西屋公司的

300MW 级发电机却是全氢冷的。面对诸如此类的种种被动性挑战,我们应该深刻思考能否在电机制造技术上打一个翻身仗?答案是肯定的,新型卧式电机的研制成功为我们带来了希望。要想把蒸发冷却汽轮发电机大型化,关键是解决好以下两方面的问题:

(1) 重新设计定子绝缘结构,使之适合于蒸发冷却方式提供的气、液、固三相的绝缘、传热体系。

(2) 优化现有的定子绝缘结构,使之以满足电气绝缘可靠性为前提,传热效率最高,即绝缘与传热达到最佳组合。

新型卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构研究的成功,将为国内提供一种安全可靠、材料利用率高、机组出力高、运行效率高、维护简单的大型蒸发冷却汽轮发电机或高功率密度的特种电机。这将是真正属于中国制造的、享有自主知识产权的电机,并且可以在性能指标上领先于世界电机制造水平。

1.2 卧式电机的定义^[13]

电机是将机电能量进行转换或者实现信号变换的电磁机械装置。若从能量转换的功能而言,电机可以分成两大类,第一类是发电机,首先通过原动机把各类一次能源蕴藏的能量转换为机械能,然后通过发电机转换为电能,经输电网送往各种用电场合;第二类是电动机,它把电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械和其他装置,以满足不同的需求。根据一次能源形态的不同,可以制成不同的发电机,与利用水利资源的水轮机配合,应制成水轮发电机;与利用热能资源的汽轮机配合,应制成汽轮发电机。对于转子转速较高的电机,如汽轮发电机,转子直径尺寸受较大离心力的限制,为了增大容量只能增加转子的长度,所以电机通常装配成卧式,使得其定子是横向水平放置的结构。这种在结构特点是卧式的电机,在本书中称之为卧式电机。除汽轮发电机以外,大多数的电动机(包括异步与同步)、调相机等均采用卧式结构,所以都可以归结为卧式电机。

1.3 卧式电机的冷却方式

卧式电机内各部件上的温度应始终保持在绝缘材料和金属材料所允许的限度之内,为此必须将运行时电机内部各部件上由于能量转换、电磁作用和机械转动摩擦所产生的损耗热传递给周围运动的冷却介质(如空气、氢气、油、水或其他介质等)。为了保证大型卧式电机的冷却效果,通常进行整体密封处理,冷却介质还要将吸收的热量传递给专门的冷凝器,通过冷凝器内的热交换后,上述损耗才能转移到电机外。与立式电机相比,卧式电机的热负荷要高出许多,所以慎重选择、设计冷却方式对于卧式电机尤为重要。

一般冷却方式与电机的功率、尺寸、电磁负荷损耗密度有关^[14],与冷却介质的物理性能参数及其与发热部件接触的方式有关,与电机所用的绝缘材料等级及金属材料的热物理性能有关,还与电机的效率、经济性和寿命有关。为了提高电磁负荷和材料的利用率,最好的途径是增大单机容量,这主要是依靠电机冷却技术的改进来实现的。例如,中小型卧式电机绝大部分是采用强迫空气流动冷却电机,而在大型电机中,冷却方式随容量、转

速、电压等级的不同而不同,经过生产实践长期累积逐步形成了一定规律,由于不同国家、不同制造企业具体条件和生产水平的差异,大型电机冷却方式的划分又存在很大的差别。现以汽轮发电机为例,世界各国针对不同电机容量的冷却方式的划分情况见表 1.1。

表 1.1 常用汽轮发电机冷却方式一览表

冷却方式	定子绕组	空气	氢	水	氢	氢内	水	水	水	油内
	转子绕组	空气	氢内	水	氢	氢内	氢内	水	水	水
	定子铁心	空气	氢	空气	氢	氢	氢	氢	水	浸油
容量范围/MW	≤50	50~240	50~200	50~110	100~800	240~1100及以上	500~1100及以上	240~1100及以上	240~500	
使用地区	世界各国	世界各国	中国	世界各国	美国、德国	美国	德国	英国、德国	原苏联	

根据冷却介质的不同,卧式电机的冷却方式可以分成空气冷却、氢气冷却和水冷却等几种,这些均是发展较成熟的常规冷却方式。

(1) 空气冷却(简称空冷)系统。一般小型异步电机多采用闭路循环系统,小型同步电机和直流电机及中型电机则采用开路循环系统。在风路设计上以轴向系统居多,也有采用径向和轴向混合系统的。不论采用何种风路系统,利用空气冷却的电机的共同特点是结构比较简单,成本较低,冷却效果较差,特别是在高速卧式电机,如汽轮发电机中,引起的摩擦损耗很大,所以在我国 50MW 以上的汽轮发电机很少使用空冷方式。但是,10MW 以下的电动机大部分仍然主要采用空冷,而直流电机中,空冷几乎是唯一的冷却方式。

(2) 氢气冷却(简称氢冷)系统。用氢气代替空气作为冷却介质,主要是因为氢气具备导热系数大、密度小、不助燃、抑制电晕等优点。最初氢气冷却仅限于绕组表面,但绝缘层内的温度下降很小,这导致氢外冷冷却效果不是十分理想。随后开始出现在实心铜线中加进若干根空芯不锈钢管,让氢气从钢管中流过以导出铜线的热量,即定子氢内冷方式,还可以将绕组由实心铜线改为空芯铜线制成。到目前为止,氢内冷汽轮发电机形式繁多,现在世界各国生产的 500MW 以下汽轮发电机中氢冷汽轮发电机占重要地位。但氢冷汽轮发电机也有其不利一面,如需要增加专门的供氢设备和控制设备,进而增加了额外的投资与维修费用,其通风系统的结构也较空冷系统复杂,而且在一定条件下还可能发生爆炸。

(3) 水冷却(简称水冷)系统。如果将水的电导率控制在一定的极限之内,水是非常好的冷却介质,它具有较大的质量热容和导热系数。在大型电机中,用水冷却绕组时,是让水从制成空芯的绕组铜线内流过,用水冷却铁心时,在铁心的轭部加装冷却水管来带走热量。但是,在上述的水系统中,一旦水发生泄露电机的绝缘系统将受到极大威胁,导致恶性的停机事故。

上述三种冷却方式的冷却效果呈阶梯式增强,与之相应的是电机主要参数线负荷增大、定转子电流密度明显增加,表 1.2 给出的是汽轮发电机不同冷却方式下的热负荷。

表 1.2 不同冷却方式下汽轮发电机的热负荷

冷却方式	空 冷	氢外冷	氢内冷	水 冷
定子电流密度 $J_1/(A/mm^2)$	2.5~3.5	3.5~4.5	6~8	8~12
线负荷 $A_s/(A/mm)$	500~600	600~800	1000~1300	1800~2400
$A_s \cdot J_1$	1600~2000	2100~3600	500~9000	12000~25000
转子电流密度 $J_2/(A/mm^2)$	3~5	4~4.5	5~8	8~12
定子热负荷 $q_1/(W/cm^2)$	0.405	0.7~1.0	1.2~2.4	3~5

表 1.2 中线负荷的变化对电机设计的总体水平意义重大,若线负荷增加,则交、直轴电抗即 X'_d 、 X'_q 、 X''_d 增大,随之电机动态稳定性下降,为了弥补这种下降,在提高线负荷 A_s 的同时,气隙磁密 B_g 也应提高,气隙长度也应增大,这样可以得到较高的电机利用系数,在不增加材料的基础上可以提高单机容量,或者在同等容量等级下减小电机的主要尺寸与体积,这时电机定转子铜耗虽然相应增加,但只要强化冷却技术,能够使材料消耗降低,电机的效率也会提高。在以往的常规卧式电机中,相比较而言,全水冷所用的材料最少,氢-水冷次之,空冷电机消耗的材料最多。

参 考 文 献

- [1] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却. 北京:科学出版社,1992.
- [2] 汪耕,李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行. 上海:上海科学技术出版社,2000.
- [3] 冯复生. 大型汽轮发电机近年来事故原因及防范对策. 电网技术,1999,23(1):74~78.
- [4] 李伟清,刘双宝. 大型汽轮发电机常见故障的检查及处理方法. 大电机技术,2000,148(3):11~15.
- [5] 周怀理. 发电机定子线棒漏水和断股的原因分析. 大电机技术,1999,147(2):18~19.
- [6] 孙维本. 水-氢-氢冷却汽轮发电机反事故措施简述. 华北电力技术,2003,32(7):32~34.
- [7] 李艳,徐凌. 国产大型汽轮发电机反事故技术措施. 华北电力技术,2000,29(3):2~5.
- [8] 吴晓蕾. 125MW 空冷汽轮发电机绝缘结构的开发. 上海大中型电机,2002,44(3):30~32.
- [9] 李立军. QF-125-2 型 125MW 空冷发电机的设计与试验. 上海大中型电机,2003,45(3):8~13.
- [10] 金耀萍,任秀华,张瑞均. 空气冷却汽轮发电机容量大小及其定子绕组绝缘方式的探讨. 大电机技术,1999,147(1):29~33.
- [11] 顾国彪. 蒸发冷却应用于 50MW 汽轮发电机的研究和开发. 中国科学院电工研究所论文报告集,1992,23(7):1~15.
- [12] 梁维燕,吴寿义. 国产引进优化型 600MW 火电机组的设计和制造. 中国电力,1999,32(10):52~55.
- [13] 李发海,朱东起. 电机学. 北京:科学出版社,2003.
- [14] 魏永田等. 电机内的热交换. 北京:机械工业出版社,1998.

第2章 卧式蒸发冷却电机的研究基础

从传热学的理论来判断,利用液体汽化传递热量具有最好的冷却效果与温度分布。新型卧式电机正是将汽化传热这一物理现象应用于电机中,开创了三种常规冷却方式之外的第四种冷却方式——蒸发冷却。卧式蒸发冷却电机主要在定子上实施新型冷却技术,以此突破了以往的常规电机定子绝缘结构,是新型卧式电机的产生基础。

2.1 常规定子绝缘结构对卧式蒸发冷却电机的限制

电机中对定子绝缘的要求如下:①使定子线圈中的电流按规定的路径流动,保持耐压性能;②将损耗产生的热量散发掉。绝缘结构的设计是根据电机产品的技术条件或使用来确定结构形式、选用绝缘材料和采用合适的绝缘工艺的,从而满足上述要求,使产品达到技术上先进,经济上合理。绝缘结构运行中应具有所要求的耐热等级,足够的介电强度,优良的机械性能和良好的工艺性,并在规定的运行期间内其性能不下降到影响电机安全运行的水平。随着大型汽轮发电机单机容量的增长,电机额定电压亦相应的提高,这就对绝缘提出了更高的要求。

电机定子的常规绝缘结构一般选用耐电性能优良和厚度均匀的粉云母为本体,机械性能、电性能和耐热性能较好的环氧树脂做胶粘剂,薄形玻璃布做补强材料,构成了云母体系绝缘^[1]。从工艺方法上可归纳为:少胶浸渍型绝缘和多胶模(液)压型绝缘。绝缘工艺实现手段上,具有代表意义的有整体浸渍型和非整体浸渍型两大类,分别介绍如下。

(1) 整体浸渍型:以环氧玻璃粉云母少胶带(或中胶带)包扎,白坯下线后整个定子真空压强浸渍无溶剂环氧漆。该技术又称 VPI。绝缘整体性好、机械强度高、传热性较好,是当今大型电机中各项指标最优的绝缘处理工艺方法。由于国内现阶段的设备和材料质量均满足不了这一技术的要求,整套工艺及所用设备、材料均需进口,我国大电机采用这种技术要投入大量资金,而且很难超越国外技术。

(2) 非整体浸渍型:以环氧玻璃粉云母多胶带包扎(有的用云母箔卷烘),模(液)压固化,下线后整个定子常态下浸渍或浇无溶剂聚酯或环氧漆。这种工艺容易实现,已经被国内电机制造企业成熟掌握^[2],但可靠性不如前者,主要表现为:①多胶带在高温下比少胶带失效快;②经过这种工艺处理可能会在主绝缘内或主绝缘与槽之间留下空气隙,既影响传热,又易引起日后空气隙的游离放电。

无论采用哪一种绝缘结构和工艺,定子线棒只能由外包的固体绝缘材料承担全部的对地主绝缘作用。这就一方面要求绝缘应具有较高的工频瞬时或短时击穿强度;另一方面要求其能长期耐受工作场强,再加之长期的机械、热和电应力作用。在考虑主绝缘厚度时,要根据电机的额定电压,给予一定的储备系数 k_i (即新线圈的工频瞬时击穿电压 U_b 与电机的相电压 U_ϕ 之比)。在正常的工艺条件下,TOA 环氧多胶粉云母主绝缘的储备

系数见表 2.1。

表 2.1 各电压等级的卧式电机主绝缘的储备系数

额定电压/kV	储备系数 k_i
6.3~10.5	>10
13.8~15.75	≥ 8.5
18~20.0	≥ 7.5
20.0~24	≥ 7

卧式电机的铁心一般比较长,制造和运行中绝缘的机械损伤较重,因此其主绝缘厚度比水轮发电机的还要厚一些。例如,定子水内冷的汽轮发电机的常规绝缘结构,10.5kV 等级主绝缘厚度为 4.5mm;20kV 等级主绝缘厚度为 6.5mm。这样的厚度若不采用铜导线管道内冷方式直接带走铜损耗的热量,则主绝缘层内外温差非常大。从式(2.1)可以看出这个结果

$$\Delta T = \frac{q_y \cdot \delta}{\lambda_c} \times 10^3 \quad (2.1)$$

式中, ΔT 为温差, K; q_y 为热流密度, W/mm^2 ; δ 为绝缘层的厚度, mm; λ_c 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

水内冷汽轮发电机的定子热流密度往往高达 $0.03 \sim 0.05 W/mm^2$, 而 TOA 环氧多胶粉云母带的导热系数为 $0.25 W/(m \cdot K)$, 假定热量全部由绝缘层散出, 将这些数值代入式(2.1)算出的温差 $\Delta T = 540 \sim 780 K$, 如此大的温升, 即使绝缘表面温度为 $0^\circ C$, 铜线内的温度也已相当可观, 早已将绝缘层炭化, 电机根本不能正常工作。所以, 若采用常规冷却方式, 电机要么降低热负荷即容量, 要么从导线内部冷却, 而对于卧式蒸发冷却电机, 因为需要采用浸润式(即将整个定子用蒸发冷却介质进行浸泡), 所以必须要打破常规绝缘厚度的“瓶颈”制约, 才能充分实现蒸发冷却的先进性。

2.2 蒸发冷却介质简介

常规冷却方式多采用对流换热, 即利用空气、氢气或者水等流体流过发热体表面时所发生的热量交换, 将发热体进行冷却。蒸发冷却原理是利用液态冷却介质蒸发汽化呈沸腾状态时, 吸收大量周围的热量达到降低电机定子温升的目的。经典的传热学理论以牛顿冷却公式为基本计算式, 即

$$\Phi = hA\Delta t_m \quad (2.2)$$

式中, Φ 为换热的热流量; h 为表面传热系数; A 为换热面积; Δt_m 为换热面上的平均温差。

由于冷却介质沸腾换热的表面传热系数远大于对流换热的表面传热系数, 导致汽化的换热数值明显大于对流换热数值, 所以蒸发冷却的效果在几种冷却方式中最好。不仅如此, 冷却介质在常温下呈液态, 击穿电压略高于变压器油, 绝缘性能优良, 兼备低沸点、不燃、不爆等性质。表 2.2 中列出了几种介质的物性参数。试验证明液态或气液两相态

的冷却介质击穿后,只要稍降低一点电压,就可以自行恢复绝缘性能,再击穿的电压值并无明显下降,除非在连续数十次击穿后,引起大量炭化,击穿电压值才逐渐降低^[3,4]。

表 2.2 蒸发冷却介质的电、热性能参数

性能 参数	冷 却 液			
	R-113 (氟利昂过度品)	FF31-A (氟利昂替代品)	FF31-L (氟利昂替代品)	Fla (氟利昂替代品)
击穿电压 U/kV	37	55	44	40
介电系数 ϵ	2.4	1.87	1.711	1.9
损失角正切 $\tan\delta$	0.006	0.002	0.0005	0.0001
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	47.6	80~85	50~60	68~70
液体密度/ (g/cm^3)	1.553	1.728	1.63	1.74
蒸发潜热/ (kcal/kg)	33.9	20	20	27.74
黏度 $\mu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	0.638	0.976	0.976	0.50
液体导热系数 $\lambda/[\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K})]$	0.0836	0.059	0.059	—

注: $1\text{cal}=4.1868\text{J}$,下同。

蒸发冷却介质并不只限于该表中所列的,用于发电机蒸发冷却的冷却介质数量不必很多,但选择蒸发冷却介质时,根据上述的介绍,需要考虑满足的要求:①介电强度高;②汽化点适宜;③化学性质稳定;④不助燃,无爆炸危险;⑤无毒,无腐蚀性;⑥当实现自循环时,可以不需要外部功率。

2.3 蒸发冷却定子绕组直线部分的绝缘与传热

由 2.1 节可以看出,如果定子仍然采用常规绝缘结构,仅仅采用对绕组外表进行浸润式蒸发冷却是行不通的,导线内直接冷却是不得已而为之的。若取消内冷,必须重新设计蒸发冷却下的定子绝缘。设计一种绝缘结构,包括采用新材料,需要与冷却紧密结合在一起考虑,二者相辅相成。对此,中国科学院电工研究所在 20 世纪 70 年代初期,曾做过不同绝缘材料对电机绕组蒸发冷却过程强化的试验,当时可用的蒸发冷却介质只有 F-11(氟利昂-11)。过程详见参考文献[5],此处只作简单介绍。

试验设备如图 2.1 所示,由蒸发器和冷凝器组成,蒸发器为一个 $\phi 40 \times 5 \times 170$ 的有机玻璃管,中间沿轴线放置一个 $\phi 18 \times 160$ 的试验管,该管借助于均匀分布的、厚 5mm 的 8 个垫环支撑在蒸发器中间,并全浸在换热介质 F-11 中,换热介质的液位保持在连通管内能看见的位置即可,整个装置是一个封闭性系统,并在期间产生换热介质的自循环过程。试验管被加热后,将热量传递给换热介质 F-11,使其呈蒸发沸腾状态,F-11 蒸气穿过储液槽和蒸气连通管进入冷凝器。在冷凝器中,蒸气与冷却水管内的自来水进行热交换、被冷凝成液体,然后又通过回液管回到储液槽进入蒸发器,完成换热介质的整个循环过程。压力表主要起对冷凝器内的气压监视的作用。试验管是该试验的主要热源:在一根 $\phi 18 \times$