

苏联电机技术

(汽轮发电机分册)

哈尔滨大电机研究所 编

大电机杂志社 出版

苏联电机技术

(汽轮发电机分册)

哈尔滨大电机研究所 编

大电机杂志社 出版

1991

前 言

苏联《电力》电机制造联合公司(ПЭО)的代表团曾于1988年2月访问哈尔滨电机厂及哈尔滨大电机研究所。访问期间,双方交换了科技出版物,我方赠给苏方历年出版的《大电机技术》,苏方赠给我方1960~1989年出版的第20~37期《电力文集》。

《电力》电机制造联合公司是苏联最著名的列宁格勒《电力》厂与科研院所、运行部门和高等院校于60年代实现横向联合的实体,几十年来它为发展苏联电机工业并使其达到世界先进水平做出了重大贡献。

《电力文集》属于厂、公司内部的不定期出版物,不对外发行。在过去的30年期间,我国没有这种刊物的馆藏,这次苏方赠送的《电力文集》是国内唯一的版本。它的特点是文字简练,图文并茂,内容具体,实用性强。它全面而又真实地反映了苏联电机工业在科研、设计、制造、运行、试验等各个领域的经验,对我们很有参考价值。

现在,哈尔滨大电机研究所与四川德阳东方电机厂已将这些《电力文集》选译出版,书名是《苏联电机技术》,分为5个分册,即:①水轮发电机;②汽轮发电机;③交直流电机;④电机一般问题;⑤新工艺新材料。其中水轮发电机和电机一般问题2分册由东方电机厂负责翻译、出版及发行,其余3个分册由哈尔滨大电机研究所负责翻译、出版及发行。

《汽轮发电机》分册在出版过程中,曾得到张信炳、许善禧、柴新华、范永达、高文生、陈永勤等各位专家的帮助,特在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,不胜感激。

——编者

目 次

氢水冷1200 MW汽轮发电机的施工设计.....	Г. М. Хуторецкий (1)
第一台2极1200 MW汽轮发电机在《电力》厂试验台的试验结果.....	Л. А. Дроздова 等 (3)
800 和1200 MW汽轮发电机.....	Г. И. Дьяченко 等 (6)
800 MW 汽轮发电机运行经验.....	А. М. Трофитов 等 (9)
500 MW 3000 r/min 系列汽轮发电机.....	Г. М. Хуторецкий 等 (11)
汽轮发电机的统系列.....	Ю. А. Базаров 等 (19)
Т В В — 500 — 2 型汽轮发电机工厂试验台试验和电站试验.....	Э. И. Гуревич 等 (30)
300 MW 绕组内冷汽轮发电机.....	Н. П. Иванов 等 (35)
四极汽轮发电机的结构.....	Е. Видеман (40)
六相汽轮发电机.....	Г. Г. Воронов 等 (46)
每极每相分数槽的六相绕组.....	Г. К. Жерве (62)
增加并联支路数的定子绕组.....	В. В. Титов (68)
直接气体冷却汽轮发电机的极限可能性.....	П. А. Сталос (83)
定子绕组槽部的 180° 换位.....	Г. М. Хуторецкий (87)
定子绕组换位对其损耗影响的试验研究.....	П. В. Ошурков 等 (96)
上下层股线数不同的双层绕组的费里达系数.....	В. В. Титов (103)
汽轮发电机转子中负序电流引起的电磁场.....	А. И. Важнов 等 (109)
负载状态下饱和汽轮发电机气隙中的三次谐波磁场.....	Э. А. Мазин (114)
汽轮发电机动态试验时测温方法的选择.....	Ю. А. Заяцев (118)
关于 θ 角测量的一种方法.....	Ю. А. Заяцев (122)
Т В Ф 和 Т В В 系列汽轮发电机气体冷却系统的试验特性.....	В. И. Герасимов 等 (127)
Т В В — 1000 型汽轮发电机定子绕组条形线棒发热试验研究.....	П. В. Ошурков 等 (134)
500 MW 系列汽轮发电机的热特性.....	Э. И. Гуревич 等 (138)
氢冷汽轮发电机定子有效铁芯温度场的研究.....	Н. С. Войгеко 等 (141)
800 MW 汽轮发电机定子铁芯的热状态.....	Н. С. Войгеко 等 (149)
棒型绕组环流的损耗计算.....	В. В. Домбровский 等 (153)
在各种负载工况下 Т В В — 500 — 2 型汽轮发电机端部磁场及发热的分布.....	В. Н. Косачевский (162)
汽轮发电机的冷却系统.....	М. Валленштейн (166)
转子气隙取气通风的研究方法.....	К. В. Песоцкая 等 (176)
大型汽轮发电机轴流式风扇最优化空气动力学参数.....	В. А. Белополюский (185)

适用于水冷汽轮发电机转子结构的气蚀水力参数	И. Ф. Филиппов	(190)
直接水冷的汽轮发电机定子绕组导线的损坏	Г. К. Жерве 等	(197)
用合成电压分工序试验大型电机绝缘的经验	З. М. Гуревич 等	(200)
大型电机定子绕组下线时热固性绝缘的变形	Т. Ю. Баженова 等	(202)
采用“СЛЮДОТЕРМ”型热固性绝缘的汽轮发电机定子绕组装配经验	Б. А. Викторжак	(206)
氟纶引水管的某些介电性能	К. Н. Чидизови	(208)
与旋转磁场有关的汽轮发电机定子振动	В. М. Фридман 等	(212)
不同工况下饱和汽轮发电机的定子振动	Э. А. Мазин	(219)
Т В В 系列汽轮发电机机座的动态特性	В. И. Иогансен 等	(228)
汽轮发电机定子铁芯在机座中的弹性固定	В. И. Иогансен	(231)
汽轮发电机铁芯弹性隔振装置的承载能力	В. И. Иогансе 等	(237)
汽轮发电机铁芯弹性支撑结构承载能力的计算	В. И. Иогансен 等	(242)
汽轮发电机的铁芯振动	Б. Х. Перчанок 等	(247)
负载对两极汽轮发电机定子振动的影响	Ф. М. Детинко 等	(251)
大型汽轮发电机定子绕组端部固定的设计原理	Л. В. Курилович 等	(257)
离心力不均和装配不正确而引起的汽轮发电机组转子振动的计算	А. П. Сивков 等	(264)
受热产生的电机转子振幅的周期变化	Б. Н. Красовский	(269)
1200 MW 汽轮发电机转子毛坯的研究	А. М. Шкагова	(272)
Т В В 1000—4 型汽轮发电机试验用焊锻转子毛坯的试验研究	З. С. Баженова 等	(274)
汽轮发电机护环用奥氏体钢 50 X 4 Г 19 的疲劳强度	О. Н. Буров 等	(276)
考虑护环端面脱开时的弯曲对汽轮发电机转子护环的计算	Л. М. Аврутина 等	(283)
氢气湿度对护环材料腐蚀开裂过程影响的研究	А. М. Боршевский 等	(290)
汽轮发电机集电环部件机械计算的精确方法	В. И. Иогансен 等	(293)
汽轮发电机集电环部件公差和强度的计算	Л. М. Аврутина 等	(298)
氢冷汽轮发电机轴的环式油密封的计算	И. Б. Проконович 等	(304)
转子端部齿和槽楔间瞬时接触电阻的研究	В. И. Косаческий 等	(311)
Т В В—320—2 型汽轮发电机的无刷励磁机	Н. И. Богданов 等	(314)
大型汽轮发电机磁场强行灭磁的效果	Л. М. Беляев 等	(317)
汽轮发电机的机械研究	Ю. С. Зубков 等	(320)
直接冷却汽轮发电机运行问题	Г. М. Хуторский 等	(324)

氢水冷1200 MW汽轮发电机的施工设计

Г. М. Х у т о р е ц к и й

1972年底,《电力》电机制造联合公司完成了世界上最大的2极汽轮发电机的施工设计,其转速为3000 r/min,定子绕组采用直接水冷,转子绕组采用直接氢冷。

额定数据

有效功率, MW	1200
视在功率, MVA	1330
功率因数	0.9
电压, kV	24
电流, kA	16.05
相数	6 (2个三相系统, 其间相差30°电角度)
氢压, kgf/cm ²	5
转速, r/min	3000
频率, Hz	50
效率, %	98.95
励磁电流, A	7640
励磁电压, V	527

电抗计算值, %

纵轴同步电抗X _d	244
纵轴瞬变电抗X _{d'}	37.4
纵轴超瞬变电抗X _{d''}	25.4
短路比	0.42

在这台大容量电机设计以前,曾在掌握容量为500 MW汽轮发电机的系列化制造和容量为800 MW汽轮发电机的第一个样机的制造和试验方面做了大量的工作。

与这些电机相比,容量为1200 MW汽轮发电机具有较高的材料利用率,因为该汽轮发电机单位容量的单位材料消耗为:

P, MW	300	500	800	1200
q, kg/kVA	0.99	0.64	0.58	0.46

这样高的指标是在某种程度上增加了电机尺寸和显著增加了电磁负载的情况下达到的。

在进行设计时曾经考虑到了在保证较高的技术经济指标和运行可靠性方面的要求。援引了一些通常用于新电机的最重要方案。

与800 MW汽轮发电机相比,发电机转子的重量增加了20%,新转子装配的重量接

近于100t, 这个增加是靠部分地增大了转子体直径及其长度而达到的。尽管有这样大的尺寸, 转子的运行转速还是处于第一和第二临界转速之间, 即同大多数大容量汽轮发电机一样。转子锻件和护环的机械性能要比工业上应用的高。可以指望转轴锻件将在一年制造出来。用于制造护环的最大可能性是采用钛合金材料, 它具有较高的机械性能和较小的单位重量。然而, 关于钛合金的应用方面的工作, 现在还处在在小容量电机上进行试验验证阶段。预计现在还没采用具有较高机械性能的奥氏体钢非磁性护环。

对于定子绕组, 已采用六相来取代普通的三相, 六相绕组由2个三相系统组成, 它们相互之间相差 30° 电角度。这个方案能显著减小作用于槽内和端部绕组线棒上的电动力。可以说, 新电机槽内的电动力将比500 MW和800 MW汽轮发电机分别减小5%和32%是没问题的。这就显著提高了定子绕组的运行的可靠性。六相接法, 还能改善电机有效体积的利用和减少附加损耗, 因为改进了气隙电枢反应磁动势的形状。

按照设计, 每个三相系统在汽轮发电机的一侧引出。这样一来, 定子绕组具有18个引出线(电机每侧有9个)。

汽轮发电机的特征是励磁电流(7400 A)较大, 它是800 MW汽轮发电机励磁电流的2倍。电流的上升很急, 要求采用无刷励磁系统。按照设计, 汽轮发电机转子连接有同步电机, 该同步电机带有二极管整流装置, 该装置装在旋转的电枢回路中。

汽轮发电机转子将不设置永久性集电环。在工厂试验台上进行发热试验或测绘特性期间可将工艺性集电环与转子连接。

重要问题之一是到达安装工地以前带有铁芯和绕组的定子机座中心部分的运输装置在重量和尺寸方面, 在汽轮发电机的生产中没有与这一部分相等的。要求制做承重为500t的专用的三维连接的铁路运输装置, 以便实现这个运输。

容量为1200 MW的2极汽轮发电机的施工设计是苏联汽轮发电机制造业发展的重要步骤。该电机在1974~1975年制造。这就能显著地提高苏联电力的技术装备和为迅速增加发电量而提供了进一步的前景。

李连贵 译

高文生 校

第一台 2 极1200 MW汽轮发电机 在“电力”厂试验台的试验结果

Л. А. Дроздова 等

容量为1200 MW的世界上最大的 2 极汽轮发电机（图 1，略）于1975 年底在列宁格勒“电力”电机联合制造公司制成，并在1976~1977 年间在工厂试验台上进行了大量的研究工作。汽轮发电机主要技术数据如下：

有效功率，MW.....	1200
总容量，MVA.....	1333
功率因数， $\cos\varphi$	0.9
电压，V.....	24000
相数.....	6
效率，%.....	98.94
转子额定电流，A.....	750

大型汽轮发电机采用传统的结构配置：座式轴承，由三部分组成的定子，带绕组的铁芯分布在其中间部分，采用环式轴密封。

列宁格勒“电力”电机联合制造公司的TBB系列的发电机冷却采用传统式的：定子绕组直接水冷及在压力下用氢填充定子机座。

为了限制作用于定子绕组的电动负载，在TBB1200-2 汽轮发电机中采用了彼此错开 30° 电角的两个三相绕组组成的六相定子绕组。由此定子绕组有18个引出端，机座每一侧有9个。

借助于3个单相电力变压器组，其中2个一次绕组错开 30° ，依靠一个接成星形，另一个接成三角形，将6相变成3相。

六相绕组的主要优点：减少电动负载的同时，提高发电机利用率及减小由定子绕组高次谐波磁势引起的附加损耗。

1200 MW汽轮发电机槽电流比 800 MW汽轮发电机的低，所以为 800 MW汽轮发电机定子线棒槽固定研制的结构方案在运行中证实了效果良好，因此1200 MW汽轮发电机采用了该方案。

在工厂中使用过的适形材料系统作为绕组端部固定的基础。

汽轮发电机采用无刷励磁系统。

发电机在工厂试验台的试验分为两个阶段，其中第一阶段包括转子在额定电流下的试验。

汽轮发电机试验通常在制造厂试验台间接工况下进行：空载——在额定电压下和稳态三相短路——在定子额定电流下。这些工况可确定效率、额定励磁电流和在这些工况施加负载下确定电机温升状况。这种方法虽然很简单，在大多数情况下，实际上可预先

确定发电机在负载下性能完满的结果；但发电机一系列特性的非线性以及某些物理量在间接工况下与其额定工况下有一定的误差，是确定期望参数的主要误差源。

在大型汽轮发电机首批样机试验时，在工厂试验台以额定励磁电流工况下进行的试验，是完全合乎愿望的。这种情况迫使必须直接检查无论是转子的热状态，或是其结构的工艺制作，负载下的振动状况，电刷-接触装置工作情况等等。

汽轮发电机在常规试验中，在间接工况下的最大励磁电流是在稳态短路工况下，定子为额定电流时达到的。现代汽轮发电机当短路比等于 $0.4 \sim 0.5$ 时，在这种工况下，转子电流为额定电流的 $0.65 \sim 0.9$ ，励磁损耗：额定损耗的 $0.42 \sim 0.50$ 。为避免定子电流或电压的不允许的过载，必须进行励磁绕组的局部或全部的双线连接，以便在试验工况下以减少转子总的磁势。

TBB1200-2 汽轮发电机转子额定电流为 7560 A ，与空载工况下的额定电压相应的转子电流为 5490 A （额定励磁电流的 0.73 倍）。TBB 1200-2 发电机转子自身重量高于 TBB 800-2 转子的 25% ；其绕组的热负载选择比上述汽轮发电机的高 50% 。容量 500 和 800 MW 汽轮发电机转子的额定电流分别为 3500 和 3800 A ，即比 1200 MW 汽轮发电机的少 $\frac{1}{2}$ 。所以必须在较高机械和热负载情况下检查转子振动状况，其绕组的冷却效果的充分性和连接接触的状况，因为具有这种电流的运行经验还没有。

TBB1200-2 汽轮发电机转子绕组由连接每个磁极上4个转子线圈的专门过桥跨接线来联接，在这种情况下励磁绕组建立的磁势约减少到 80% ；在额定励磁电流下，定子电流为额定的 30% 。在这个试验周期中，进行了无励磁的空载工况和有不同励磁电流的几个短路工况的试验。励磁电流是分阶从 2400 A 开始升高，每阶约为 1000 A ；从而得到了转子绕组温升与绕组析出的损耗的关系曲线。 4500 A 定子电流对应于 7500 A 转子额定电流计算值。根据试验结果，额定电流下的转子绕组温升为 36°C ，即明显地低于允许值。应指出，温升达到的等级，比 300 和 500 MW 汽轮发电机在运行中表现的良好状况下的低很多。

汽轮发电机的第二个试验周期包括了在间接工况下和在一个三相系统负载工况下的机械的、电气的和发热的试验。确定了空载和短路特性。空载下对应于额定电压的励磁电流为 2516 A ，而短路下对应于双绕组定子额定电流的励磁电流—— 5440 A 。按照空载和短路特性确定的额定励磁电流等于 7330 A ，与计算值非常吻合。并且短路比等于 0.46 ，静态过载能力为 1.59 。

在确定特性时，施加 1.3 倍额定电压持续 5 min 和施加 1.5 倍定子额定电流过载 1 min 来检查定子绕组绝缘。

汽轮发电机热状态和通风系统特性是在空载工况、两个三相系统短路工况和每个三相系统负载工况下进行确定（在后两种情况下第二个三相系统是开路的）。电机发热状况按常规温度检查以及用发电机生产和装配过程中安装的辅助测量元件来检查；总共安装 554 个热电偶。TBB1200-2 汽轮发电机不提供三相系统分开工作。因此，这种工况不是运行工况，而通过这些工况只是为了更充分地研究汽轮发电机运行可靠性。

所作的发热试验表明，构件温升等级处于标准范围内。在空载情况下电机的温度场

特点是均匀性，在额定电压空载工况下转子绕组温升为 7.9°C ，铁芯为 15.7°C 。在短路为定子额定电流工况下，转子绕组温升为 19.7°C 及定子绕组为 12.3°C 。在一个等于600 MW的三相系统在负载下和 $\cos\varphi = 0.9$ 时转子绕组温升为 25.4°C ，定子绕组为 20.7°C 及铁芯为 24.9°C 。在试验时确定了汽轮发电机的效率。在机座中氢压 0.5 MPa (5 kgf/cm^2) 效率为98.86%。

在冲击负载作用下为了研究发电机结构的可靠性和确定参数，对一个三相系统（第二相是断路的），在定子电压为额定电流的0.2和0.4倍时，进行了突然短路的试验。同时对定位筋的机械应力、绕组和铁芯的位移及为确定参数所必需的电物理量进行了示波记录。弹性定位筋切向最大应力不超过 $\pm 11\text{ MPa}$ 。内、外环端部振动完全重复铁芯的振动。这说明固定结构有大的整体性和抗振性。从突然短路试验得出的电磁参数为 $X_d' = 0.243$ ， $X_d'' = 0.202$ 。这些参数相应于一个（三相）绕组的短路，所以与全台电机在整体上看是有区别的。

机械试验包括确定铁芯、机座和定子绕组端部振动等级及铁芯紧固件的机械应力。弹性定位筋机械应力分析表明，机械应力值不大，额定电压空载工况下达到其最大值，且径向约为 1.2 MPa ，切向 $\pm 0.5\text{ MPa}$ 及扭矩应力 $\pm 0.3\text{ MPa}$ 。

铁芯和定子机座的振动状态用40个振子测量器确定。在额定电压空载工况下铁芯的径向振动等于 $39 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 。横截面振动分布具有均匀性。在工作范围内铁芯没有共振频率。

机座最大振动出现在额定电压空载工况下，在铁芯中间断面约为 $12\text{ }\mu\text{m}$ ；共振频率为72、85.5和95 Hz。

汽轮发电机端部振动状态研究表明，在所有工况下其振动特点是振级相当低并稳定。在额定电压空载工况下端部振动为 $15 \sim 23\text{ }\mu\text{m}$ ，而在额定电流和两个三相系统在稳态短路工况下为 $50 \sim 70\text{ }\mu\text{m}$ 。

转子振动试验是在超速平衡试验建筑物中和发电机试验台上作平衡时进行的。平衡后轴承的振动为 $10 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 。在间接工况和负载工况下的试验时，振动处于 $23 \sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。

所作的试验表明，在设计TBB 1200-2汽轮发电机中采用先进的结构方案可制造有高技术-经济指标的电机。转子绕组直接水冷的改进系统能使转子具有较大的热储备，并可允许继续增加汽轮发电机的单位容量，因而是有发展前途的。

发电机振动状况表明，所研制的结构满足大容量汽轮发电机提出的要求，且足够可靠，足以克服大的电动力和机械力。

目前TBB 1200-2汽轮发电机通过了各部门间联合委员会的工厂初步验收，委员会指出，这台电机吸取了国内、外电机制造的最新成果，设计达到高技术水平。试验结果表明，在所作试验部分，汽轮发电机符合技术规范和技术条件的要求。

姜云芬 译

刘上棉 校

800和1200 MW汽轮发电机

Г. И. Дьяченко 等

800 MW、3000 r/min、24 kV、 $\cos\varphi = 0.9$ 的汽轮发电机设计于1968年完成并于1969年制成。这是苏联较大的一台汽轮发电机，在结构原理上，这台汽轮发电机属于TBB系列，冷却系统为：励磁绕组铜线采用氢内冷，定子绕组采用蒸馏水冷却。这种冷却系统在《电力》厂的150~500 MW汽轮发电机上一直应用得很成功。

除1969年的800 MW汽轮发电机的生产准备以外，1000 MW负载电机的生产于1968年就已开始了，这台电机供工厂试验站对大型汽轮发电机作带负荷试验用。

在尺寸、绕线规格、有效层的几何尺寸和结构型式上，1000 MW负载电机与800 MW汽轮发电机的相同。负载电机结构上的微小差别是：轴从滑环端与25 MW同步电动机相连。

负载电机按800 MW汽轮发电机的图纸制造能试验新型汽轮发电机所采用的基本结构方案和工艺方案，使工艺装备统一和降低此两种电机的生产成本。亦须指出，零部件的互换性是新型电机的重要特点。

1 基本技术数据和参数

800 MW汽轮发电机能在额定工况下长期运行。与所有小容量汽轮发电机（ $\cos\varphi = 0.85$ ）的区别是：新电机的功率因数为0.9。由于单位载荷很高和电机有效部分的尺寸有限，所以对这样大功率的电机来说，提高额定功率因数是合理的。

除额定工况外，汽轮发电机还能在带较大的有功或无功功率的长期工况下运行，还考虑了在有功880 MW和 $\cos\varphi = 0.9$ 下，须将氢压从额定工况的4.0 atm提高到4.5 atm。

当机座内的氢压为4.5 atm和冷却水温达23℃时，汽轮发电机在功率因数0.85下，在端子上能发生800 MW的功率。对这样大功率的汽轮发电机来说，额定电压取24 kV，迄今，《电力》厂汽轮发电机的最大电压为20 kV。随着功率的增大，提高电压对定子绕组，特别是引出线的结构型式的影响是有利的。

从运行方面对电机参数提出了严格的要求，特别是提出了限制纵轴瞬变电抗 X'_d 的值。在汽轮发电机的施工设计中，有效材料的高度利用，不仅是因线电流负载提高，而且还因提高了电机的气隙磁感应。因电机的气隙磁感应在空载下为9500 Gs，它比小功率汽轮发电机的要高得多。这些措施能得到 X'_d 的计算值，它在非饱和状态下为32%，即比500 MW汽轮发电机的要小些。

新电机的静态过载能力约为1.6，这符合这种功率汽轮发电机新标准ГОСТ533-68的要求。

强励时，励磁顶值电压和励磁电压上升速度为 $2 U(V)$ 和 $2 U(V/s)$ 。双倍额定励

磁电流的允许持续时间不应超过 $15 \sim 20 \text{ s}$ 。在这方面,对励磁系统的要求与对小功率电机的要求差别很小。

2 结构

定子机座为分瓣的,由三部分组成。两端部有一水平合缝面,在工地与中间部分把合,并安有4个立式气体冷却器。定子中间部分装带定子绕组和铁芯。定子分成三部分主要是受运输和安装条件的限制,同时,也是《电力》厂300 MW及以上的汽轮发电机的传统结构。800 MW汽轮发电机定子中间部分的重量为300 t以上。

滑动轴承为座式结构。转子的工作转速高于第一和第二转速,第三临界转速大大高于工作转速。

铁芯与机座为弹性固定;用于铁芯扇形片固定的鸽尾上的拉紧定位筋有一些切槽,视定子内挡风板的数量而定。铁芯由厚0.5 mm的冷轧高合金电工钢绝缘冲片叠装,它叠成若干铁芯段,由宽5 mm的径向通风沟隔开。电工钢轧制方向与定子齿一致。

铁芯压板由高电阻率非磁性钢制造。由装在压圈上的铜环制成的电屏蔽能防止边段铁芯轭部的端部漏磁。端部区的所有紧固件都是用玻璃基的绝缘制成。

定子绕组结构采用由空心 and 实心股线制成的线棒。所有股线均在电机槽部进行换位,此外,还考虑了绕组端部的特殊换位,以消除定子绕组端部漏磁通引起的涡流循环。

绕组的对地绝缘为СЛЮДОТЕРМ型热固性B级绝缘。绕组为双层结构,端部为锥形布置。线棒每端均用硬焊料焊有一个实心浇注的铜接头,以便在绕组装配时与其他线棒进行电气连接。所有线棒的水路均为并联,水由汽机端供给绕组,而由励磁机端排出。

上层线棒(靠近定子内孔的)的截面较大,而且空心导体数比槽底的线棒要多。采用这种结构型式能均衡上下层线棒的损耗和发热,这点对并联冷却的所有线棒来说是很重要的。还考虑了用电阻温度计对每个线棒进行热检查。

分布在定子机座内复板上的管子作供水和排水的汇水箱用。汇水箱由两层塑胶制成的绝缘软管与绕组相连。连接母线和定子绕组的引出线也用水直接冷却。

三个直线引出线在机座下部布置成一排,引出线之间的距离能保证用铝外壳与封闭式汇流排进行连接。六根零位引出线布置在励磁机端定子机座的上部。零位引出线用护套包住。

定子绕组按接通绕组、热交换器、过滤器和水泵的闭路循环进行冷却。800 MW汽轮发电机采用抽气式冷却系统。冷气体经气体冷却器后直接进入电机内,并从定子铁芯背部进入径向沟。

氢气在转子本体两边的两个风扇的作用下在机座内循环。转子由高机械性能的整块特殊钢锻成,本体直径取得很大,它超过500 MW汽轮发电机转子本体直径75 mm,长度超过500 MW汽轮发电机的14%。装好后的转子整个重量为83 t。

转子绕组槽部由转子槽楔上的特殊风斗(它沿旋转方向向前倾斜)直接从气隙中取气进行冷却。气体通过槽楔上向后倾斜的孔从绕组中甩出。在这方面,转子绕组的冷却是《电力》厂所有汽轮发电机的传统冷却方式。但是,为了进一步强化励磁绕组的气体冷却,将绕组铜线的冷却面积加大了。

转子槽为梯形结构。绕组绝缘为玻璃基和环氧漆基的F级绝缘。为了提高转子端部的耐热性,防止负序电流的作用,转子上安有一个短路环,它是两层铜梳形件的形状,梳形件搭接在从外面包住转子绕组端部的绝缘上,梳形件的齿分布在绕组槽中的槽楔下面和大齿上铣出的特殊槽内。转子槽部不嵌放特殊的阻尼绕组。

非磁性钢转子护环在转子体上只有一个配合面。为防止轴向位移,转子护环用从外面拧在护环前段上的螺帽把住,螺帽本身用开口键支撑在转子体上。为了减小转子刚度在相互垂直轴线上的差别,在大齿上设有横向切口。

为使集电环能良好工作,在保证电流沿集电环均匀分布方面制订了一些措施,用两个离心风扇来强化集电环的冷却,并设计了通风孔系统。

为了防止机座漏氢,转轴采用环形油密封。在整个机组转轴因热膨胀而产生轴向位移的情况下,油密封能保证可靠的运行。

3 励磁

新型汽轮发电机由模型功率约6000 kW的三相同步发电机来励磁。交流整流由两个串联的直流桥式电路进行整流。为此,定子绕组由两个接成三角形的独立绕组制成,每个绕组都能在自身的整流电桥上工作。

励磁系统都采用可控晶闸管(硅)半导体整流器。

4 1200 MW汽轮发电机的设计

除制造800 MW、3000 r/min的单轴汽轮发电机外,列宁格勒电机制造联合公司的科研所正在进行更大功率(1200 MW)汽轮发电机的技术设计。

这台汽轮发电机的额定数据如下:1200 MW、24 kV、3000 r/min、 $\cos\varphi=0.9$ 。这台发电机的制造可在1973~1975年完成。

看来,近期要大大提高电压(20~24 kV以上)在技术上是是不可能的,因此,为了降低槽内的电流量和简化引出线与汇流排的制造,打算将定子绕组制成两个彼此相错30°电角度的独立三相系统。这种定子绕组结构能显著降低附加损耗和改善电枢反应的磁动势波形。绕组系数的某些改善,也能提高有效材料的利用率。

由于1200 MW汽轮发电机的有效尺寸和重量将比800 MW汽轮发电机的有所提高,所以,在定子运输方面需要解决一系列复杂问题。这里,将定子分成三部分,把带绕组的铁芯分布在中间部分的通常做法,对工厂来说已是不够的。需要在运输时进一步减轻重型部件本身的重量。

新的大型汽轮发电机的冷却系统考虑:定子绕组采用水冷,转子绕组采用水冷或氢冷。

在设计阶段,对转子绕组两个冷却系统方案所进行的试验都是合理的。为使这种冷却系统对这种大型汽轮发电机能有充分的效果,看来,需要进一步强化转子绕组的气体冷却。

考虑到1200 MW汽轮发电机的励磁功率较大,一个主要的励磁方案是带旋转整流器的无刷励磁系统。

800 MW 汽轮发电机运行经验

А. М. Трофитов 等

1971年12月末，在斯拉维扬斯克国营地区发电站，苏联和欧洲首台容量为800 MW的两极汽轮发电机并网，这是苏联动力技术的一项大的成果。

汽轮发电机属于列宁格勒《电力》电机制造联合公司生产的氢-水冷系列电机。这一系列电机的特点是气隙取气的转子绕组直接氢冷和定子绕组直接水冷。

图1（略）示出了汽轮发电机在电站上的概貌，图2（略）为转子向定子内插装的情形。

1972年，在运行中，基本上调试好汽轮发电机。

从1972年11月起汽轮发电机正常运行，至1973年1月达到了额定参数：

容量，MW	800
电压，kV	24
$\cos\varphi$	0.9
电流，kA	21.4
转速，r/min	3000
氢气表压，kgf/cm ²	5
效率， η	98.83

机组达到如下的参数：

	1972年	1973年	1974年（1~7月）
运行时间，h	2401	7119	4843
时间利用率	0.276	0.312	0.942
平均容量，MW	334	588	545
平均容量对额定值的百分比	41.7	73.4	68
最大容量，MW	720	830	840

这就是说，在1973年，在电机的利用率上，已经达到相当高的运行指标。

在接近额定工况值下进行的热、通风、机械等试验证明汽轮发电机达到相当高的技术指标。

图3曲线示出了转子绕组对冷却气体的平均温升与励磁电流平方的关系。温升35℃与额定励磁电流相对应。当考虑到电机增高的电磁负载与大的容量，应当认为，励磁绕组的冷却质量是非常高的。标出的转子温升足以说明，对于氢-水冷系列所有电机来说是最底的。

通过改进径向-切向冷却系统取得了转子绕组相当大的强化冷却。这样的改进不仅保证了容量为800 MW汽轮发电机转子的可靠冷却，而且还允许建造具有足够高热储备的大型电机。

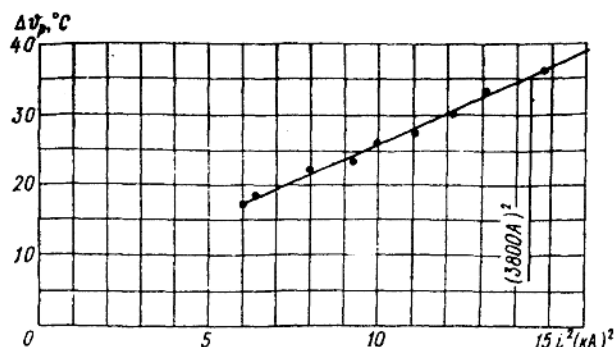


图3 转子绕组平均温升对励磁电流平方的关系

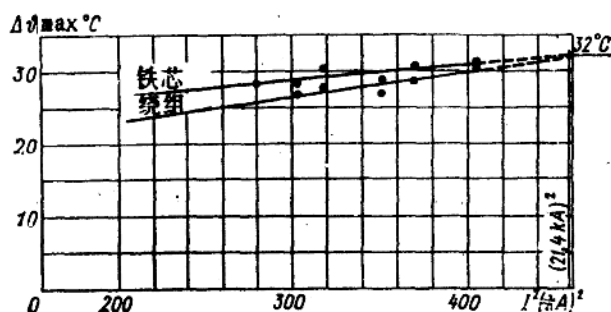


图4 定子的绕组和有效铁芯的最高温升

这样，汽轮发电机的全部热状态应该认为是良好的，与此同时，如在交货技术条件上预先说明的，汽轮发电机能以10%的过载连续运行。

电机的振动特性是很重要的。为了保证把定子铁芯振动的固有频率充分调离100 Hz的激振频率，在适当高度的铁芯轭部下，首次采用了沿齿取向的冷轧电工钢片排列。因轧制增高的横向弹性系数在运行工况下能使铁芯振动级达到很低水平。这样在700 MW、200 M Var、23.8 kV工况下铁芯振动是37 μm，而在800 MW、130 M Var、23.5 kV是35 μm。

在低的铁芯振动和铁芯固定在定子机座上用的良好弹性元件结构，在上述的工况下机座的振动是10~17 μm。

在带800 MW负载时，电机总的噪声级为94 dB。

对定子绕组端部的振动状态，给予了特别的注意，因为这是保证可靠运行的最重要指标之一。在制造厂试验台上，进行了在各种工况下的详细的试验之后，为了在运行中长期观测绕组振动状态，保留了所有的测量传感器。为了电机的必要安全性把传感器装在发电机的零点附近的定子绕组线棒上。

长期的观测表明绕组端部振动状态逐渐地趋向无改变。这表明了绕组固定的稳定性。低振动级的特征可以用在700和800 MW运行工况下所取得的如下数据表明：

鼻端径向振动, μm 16~61

鼻端切向振动, μm 20~70

定子绕组端部刚性固定是最有前途的, 因此, 以后, 在大功率汽轮发电机绕组端部固定上, 也将采用刚性固定。

在机座内表压为 5 kgf/cm^2 的氢压下, 容量800 MW汽轮发电机运行正常。为了必要的气密性和消除氢泄漏, 采用了奇特的带有两个瓦衬的环状油密封。第一个密封环在比氢压高 $0.9 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$ 的密封油压下工作。第二个补偿瓦的补偿油压稍低于密封油压。这样的调整密封性能的柔性系统, 在瓦温低的情况下, 巴比特合金轴瓦的温度是 $55 \sim 65^\circ\text{C}$ 。

这样, 运行和所进行试验表明, 电机具有良好的参数和能够保证连续可靠的运行。

之所以能保证汽轮发电机较快地进入正常运行, 主要是由于在制造厂试验台上汽轮发电机进行了近于额定参数的负载工况试验, 以及在电站运行条件下的实际运行。运行结果允许我们认为: 在结构设计中 and 工艺制造中执行的基本技术方案是正确的, 保证了运行中电机的可靠工作。

所有这些, 都允许我们去进行这类大容量汽轮发电机的成批生产。

第二台容量为800 MW汽轮发电机, 现在正处在制造阶段, 按其参数和结构方案基本上与第一台相同, 但是为了使第二台的结构设计和制造工艺向成批生产接近, 要参考第一台电机运行和制造经验。第二台电机将根据第一台电机研究中所制订的大纲, 在大型汽轮发电机试验台上进行研究和试验。

容量为800 MW的氢-水冷汽轮发电机是第十个五年计划中发展苏联电力事业的基础电机。

参考文献 (1种, 略)

梁由贵 译

王泽仁 校

500 MW 3000 r/min系列汽轮发电机

Г. М. Хуторецкий 等

1964年, 在《电力》厂制成了苏联第一台500 MW、3000 r/min两极汽轮发电机^[1]。这种汽轮发电机与一些较小容量的汽轮发电机相比较, 其不同之处有: 转子矩形槽改为梯形槽; 转子两端是带有短路梳形阻尼铜环的单个装配的护环组件; 转子上加装了两个离心式风扇来代替通常的轴流式风扇。为了平衡沿两个相互垂直轴线的转子刚度, 则在转子的大齿上开有横向槽。

汽轮发电机在工厂试验台和使用条件下进行了全面试验之后, 深入研究了成批生产

的汽轮发电机结构。

汽轮发电机的额定数据、参数以及有效的基本尺寸与结构件均保持和以前一样。

汽轮发电机的额定数据:

有功功率, MW	500	转子电压, V	47.5
总容量, MVA	588	冷却水温度, °C	+ 33
功率因数	0.85	感抗的计算值, %	
电压, kV	20	X_d	24.8
定子电流, kA	17	X'_d	36
转速, r/min	3000	X''_d	21
效率, %	98.71	X_2	30
氢气表压, kgf/cm ²	4.5	短路比, f_0	0.144
励磁电流, A	3550		

在制造系列汽轮发电机时, 采用如下改进的基本结构: 将定子绕组的热塑性沥青绝缘改为《斯留达特尔蒙》类型的热固性绝缘; 将单流径向定子铁芯冷却系统改为切向-径向系统; 将定子绕组端部的柔性固定系统改为刚性的固定系统; 定子机座和铁芯刚度更高些; 定子铁芯的弹性悬挂使柔性更大。

在1971年开始制造500 MW系列汽轮发电机。

当电压变化为+5%时, 允许汽轮发电机运行。

在功率因数变化时, 汽轮发电机可以按照功率曲线图(图1)运行。

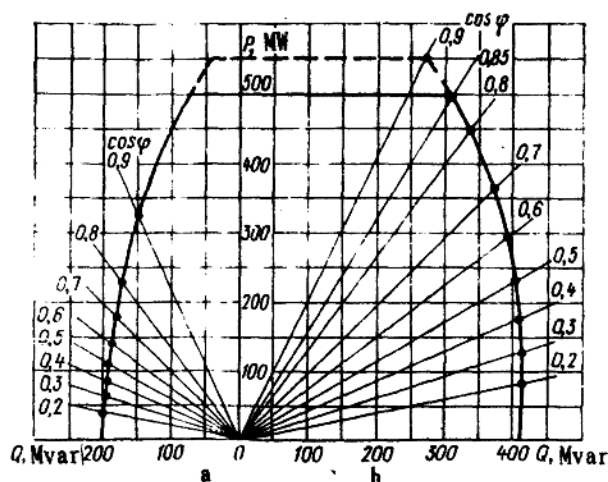


图1 功率曲线图

a — 欠励 b — 过励

在不对称短路情况下, 保证 $I_2^2 t \leq 8$ 的工况 (I_2 — 逆序电流, p. u. ; t — 时间, s)。