

北京图书馆藏

41076

中文资料

大型水电机组译文集

(第二部分)

哈尔滨大电机研究所技术情报室

一九七九年十二月

T 17312

2 = 2

目 录

发 电 机 部 分

加拿大大型水轮发电机的应用	(加) Paulg. Mcconnell (1)
大型水轮发电机发展的某些问题	(法) G.L. Ruelle (4)
大型高速水轮发电机结构和参数的特点	(苏) М.П. Костенко等 (7)
大型电机采用水流模拟法分析通风	(日) 渡部正敏等 (13)
直接冷却对水轮发电机尺寸和参数的影响	(瑞典) C. Tengstrand等 (22)
水冷同步电机的运行经验	K. Baltisberger (瑞士) (28)
水轮发电机定子绕组端部发热和通风状态的研究	(苏) Н.А. Тубайдуллин (35)
凸极同步电机励磁线圈横向风沟中风速的分配	(苏) В.П. Анемподистов等 (40)
布赫达尔明斯克水电站水轮发电机转子强制冷却系统的试验	(苏) Е.Е. Фишкин等 (45)
带有“船”型极间撑块的水轮发电机散热翅式磁极线圈用 模型所作的散热试验研究	(苏) Е.Е. Фишкин (52)
转子强迫通风水轮发电机励磁绕组发热温度的确定	(苏) Е.Е. Фишкин等 (56)
水轮发电机损耗的分配	(苏) В.В. Домбровский (60)
根据自制动实验数据用《明斯克 1》数字电子计算机 确定同步电机损耗的方法	(苏) В.О. Коган等 (68)
大功率发电机汇流排有效电阻计算	(苏) И.Ф. Кузнецов等 (72)
匝间短路或部分线匝断头时在同步电机分支绕组里的电流	(苏) В.В. Домбровский (77)
水轮发电机最优设计的一些问题	(苏) В.В. Домбровский等 (86)
保证大型高速推力轴承润滑的油密封	(美) R.A. Baudry等 (93)
日本大型水轮发电机的推力轴承	(日) 立石贞夫等 (101)



A792157

大型推力轴承的性能·····	(日) 田附和夫 (111)
改进水轮发电机定子的途径·····	(苏) A. A. Дукштау 等 (127)
电机气隙的无接触检测及监视·····	(瑞士) Stanislaw Lebeda 等 (130)
列宁格勒“电力”联合公司的现代水轮发电机·····	(苏) Ю. В. Арошидзе 等 (137)
大型凸极电机的机械问题·····	(美) K. H. Saling (140)

水 轮 机 部 分

水力机械叶片中的有势流动·····	A. Nyiry (149)
水轮机转轮出口旋流压力脉动性能·····	(日) Yutaka Hosoi (162)
用旋流动量法分析计算模型和真机尾水管压力脉动·····	(美) Uldis J. Palde (172)
大容量高水头水泵水轮机顶盖及进水阀的强度振动试验·····	(日) 生田清等 (178)
在真机上研究水轮机导水机构力特性·····	(苏) Л. Я. Маргслис 等 (195)
高水头水泵水轮机模型试验的问题·····	(奥地利) J. Klein (202)
高水头水电站钢筋混凝土蜗壳的近似计算·····	(苏) Л. В. Касабьян (213)
大型高水头混流式水轮机的蜗壳·····	(苏) А. П. Ковревский (224)
水轮机的结构、材料和强度分析的进展·····	(日) 山口幸男等 (227)
世界最高扬程 621 米单级水泵水轮机·····	(日) 原田清等 (234)
大容量高水头混流式水泵水轮机的研究和发展·····	(日) 安藤治定等 (241)
大型混流式水轮机和水泵水轮机的发展动向·····	(日) 原田清 (253)
大容量高水头混流可逆式水轮机的分瓣转轮·····	(日) 渡边敬 (262)
萨彦舒申斯克水电站的水轮机及其辅助设备·····	(苏) (278)
邱吉尔电站水轮机的金属加工·····	(加) C. M. Seifert (285)
水轮机座环电渣焊·····	(日) 北村 (288)
转浆式水轮机选择和设计的现代趋势·····	(意) F. de Siervo 等 (293)
轴流转浆式水轮机模型的应变测量·····	(瑞士) F. Schwelzer (313)
含 13% 铬不锈钢疲劳试验的一些结果·····	(瑞士) B. Bärp (316)
高水头混流式水轮机 P0500 能量平衡·····	(苏) В. А. Колячев 等 (320)

加拿大大型水轮发电机的应用

(加) Paulg.Mcconnell

加拿大的总装机容量有 3/4 是水电。估计加拿大的水力资源,在正常水流情况下,有 8500 万千瓦,其中 1/4 业已开发。仅在安大略就兴建了许多水利工程。在尼亚加拉有一个抽水蓄能系统已运行了许多年。

从 1910 年到 1920 年,在兰金和维尼根安装了 1.6 和 2 万千瓦伏安的机组。在 1920 年以后的十年间,昆斯顿的 4.5 万千瓦伏安 25 周波的机组,在当时是前所未有的。1942 年西卜绍电站的 7.5 万千瓦伏安机组虽不如第聂伯或大古力的机组大,但它是加拿大发展的重要里程碑。在五十年代,继凯玛诺电站的 11.4 万千瓦伏安机组之后,帕西米斯 I 电站的 12 万千瓦伏安机组和帕斯舒德电站 16.5 万千瓦伏安大型水电机组标志着加拿大水电事业的飞跃发展。在六十年代,苏联建成了布拉茨克电站(单机 26 万千瓦伏安),而加拿大建成了泡太基山电站(额定容量 23.9 万千瓦伏安,最大容量 27.5 万千瓦伏安),在七十年代初期,在大古力电站投入运行之前,不用直接水冷的邱吉尔瀑布电站机组将是最大的水电机组。

加 拿 大 电 站

表 1 列出了为加拿大电站安装或定货的 93 台额定容量超过 10 万千瓦伏安的水轮发电机。其中 76 台是加拿大自己制造的。另外,加拿大为新西兰的奔茂电站提供六台 11.25 万千瓦伏安,166.3 转/分机组;为阿克桑堡、加纳电站提供 4 台 14.24/16.35 万千瓦伏安、115.4 转/分的机组,还有为印度爱地基电站承制 3 台 14.4 万千瓦伏安、375 转/分机组的定货。显然,大多数机组是低速的。

表 1 加拿大单机容量超过 10 万千瓦伏安的电站

电 站	额 定 数 据		转 速 (转/分)	机 组 序 号		第一台机 组 投 入 运行时间
	额定容量 (万千瓦伏安)	最大容量 (万千瓦伏安)		安 装	运 行	
邱 吉 尔 瀑 布	50	50	200	10	0	1972
泡 太 基 山	23.9	28.5	150	3	0	1971
	23.9	27.5	150	5	3	1968
奥 塔 德 3	19.9	19.9	163.6	4	0	1969
奥 塔 德 4	19.75	19.75	163.6	4	0	1969
大 本 德	17	19.6	150	1	1	1967
	16	18.4	163.6	1	1	1965
约 旦 河	16.7	20	257	1	0	1971

续表

电 站	额 定 数 据		转 速 (转/分)	机 组 序 号		第一台机 组 投 入 运行时间
	额定容量 (万千瓦安)	最大容量 (万千瓦安)		安 装	运 行	
马尼库亚甘5	17.8	17.8	180	8	0	1970
帕 斯 舒 德	16.5	19	200	5	5	1959
贝 西 米 斯 I	12	13.8	277	8	8	1956
贝 西 米 斯 II	12	13.8	163.6	5	5	1959
下 诺 契	12	13.8	109.1	2	0	1971
凯 特 锐 必 斯	12	13.7	90	7	0	1970
大 拉 匹 兹	11.5	13.2	327	4	4	1965
凯 玛 诺	11.4	13.2	327	4	4	1956
	10.6	12.2	327	4	4	1954
维 尔 斯	10.7	12.3	112.5	2	0	1970
米 克 塔 维 克	10.8	12.2	112.5	3	3	1968
玛 尼 塔	9	12	120	4	4	1954
共 计				93	50	

影响加拿大水电发展的另一个因素是：1. 电站离载荷中心距离远，这就促进高性能的静止励磁系统的发展，并要求发电机采用特殊的技术参数。例如泡太基山电站的电机瞬变电抗最大为 0.176 和惯性常数 H 最小为 4.63。2. 由于气候条件限制，很多地方都不适宜建立露天电站，可是在五十年代建立了一些半露天电站。

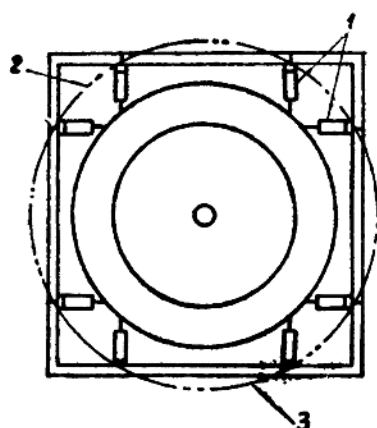


图 1 典型的水轮发电机平面图，
1—冷却器，2—冷却空气，
3—机座等值圆直径

加拿大发电机的实践

自从西卜绍电站建厂以来，加拿大电机如果说不不是全部的，那么也是绝大多数是方的。方型机座占厂房空间位置很小，适应于安装在长方形厂房里。图 1 示出了一台这种型的设备。

加拿大大多数低速机组是伞型结构，也就是说，推力轴承和导轴承安装在转子下面，且没有上导轴承。使用这种结构的准则包括稳定性、临界转速和度限制。图 2 是典型的伞型发电机剖面图。

表 1 列出了所有 200 转/分以下的这类发电机的一般结构。帕斯舒特电站的 200 转/分机组是小型的，但它有附加的上导轴承。邱吉尔瀑布电站也是 200 转/分的机组，推力轴承安装在水轮机顶盖上。两个导轴承一个安装在水轮机上，另一个安装在发电机上。

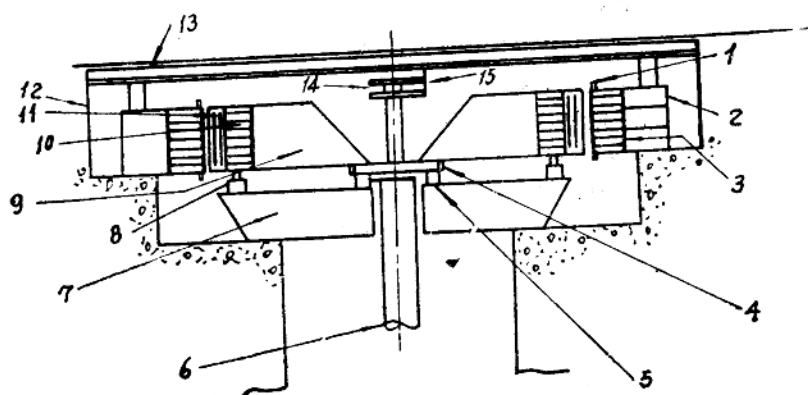


图 2. 典型的伞型发电机剖面图

- | | | | |
|---------|----------|---------|---------|
| 1. 定子绕组 | 2. 定子机座 | 3. 定子铁芯 | 4. 导轴承 |
| 5. 推力轴承 | 6. 轴 | 7. 下机架 | 8. 制动器 |
| 9. 支架 | 10. 转子磁轭 | 11. 磁极 | 12. 基础壁 |
| 13. 上机架 | 14. 滑环 | 15. 电刷 | |

除图 2 示出的一般结构外，还有一些值得注意的特征是：

1. 转子支架制成或像一个大的离心式风扇，通过转子磁轭的风道为机组提供大量冷风。

2. 图 2 示出的轴既为发电机的轴，又为水轮机轴，推力轴承支承在发电机的轴端。邱吉尔瀑布电站、泡太基山电站、奥塔德 3 和 4 和帕斯舒德电站的发电机都具有这个特点。

加拿大许多电站都利用这个特点来减小对吊车的要求，使吊车及其支撑结构的成本与电机安装工时的附加成本达到平衡。实际上，通常都采用增件方式安装转子，即支架，磁轭和磁极在现场进行装配。水轮机通路通常是移去转子支架和下机架，把磁轭和磁极留在应有的位置来实现。在有些情况下，将增件式装配与顶起或抬起定子的系统组合起来，使得在不移动转子的情况下允许接近定、转子，便于维护。贝西米斯 I 电站、大拉匹兹电站和米克塔维克电站均备有增件式装配，维尔斯和下诺契电站备有增件式装配和抬起定子装置。

加拿大大多数机组安装时采用喷雾防火措施，也有些是用二氧化碳系统来防火的。

设计实践

制造厂提高发电机额定容量的能力取决于设计技术和材料的改进。改进后测得的出力因数（千伏安 $\times 10^5$ /转/分/ D^2L ）为：

1940 年西卜绍电站电机为 8.2

1950 年贝西米斯电站电机为 9.6

1960 年奥塔德电站电机为 12.0

1970 年邱吉尔瀑布电站电机为 16.5

水轮发电机的设计包含有许多经验成分，所以希望限制达到合理阶段的未知因素的偏差。因此，邱吉尔瀑布电站的设计大部分保持了泡太基山电站的经验，这些经验是几年前严

格参考了帕斯舒德电站而获得的。

过了些年在设计上又有了一些重要的突破，比变革前又有了很大的改进。为了能够制造较大的机组，所作的一些重大变革如下：

1. 在30年代，以加工制造代替了铸造。
2. 在40年代，采用磁轭通风。
3. 在50年代，采用了悬式（伞式）结构。
4. 在60年代，改进了绝缘系统和高强度磁轭钢板。

我们将来要做大型水轮发电机。现在制造工艺已具备，邱吉尔瀑布和大古力电站的经验进一步推广在未来发展中将给出信心。若降低对转动惯量和电抗的要求，采用水冷定子转子是有益的。这将在电和机械两方面产生进一步的重大革新。

在加拿大，核电站很盛行，期望看到建造较多的抽水蓄能系统，就像最近十年在美国所发生的那样。

结 论

加拿大的电力生产在很大程度上依赖于水力发电，而且还有巨大的未经开发的水力资源。在建造水电站和制造发电设备方面，加拿大已发展到较高水平。今后将继续应用和增加知识与能力。

（参考文献四种从略）

姜云芬 摘 译自《Proceeding of the American Power Conference》
1969.vol.31.PP.801—804

刘彦清 校

大型水轮发电机发展的某些问题

（法）G.L.RUELLE

50万千瓦发电机出现故障的可能性要比5万千瓦的发电机大，更应很好加以考虑。

自1950年以来，对巨型发电机的需求大为增加。因此，制造者所关心的是设计特大容量的电机；感到不安的是满足用户所期望的大型机组的可靠性比中型机组还高的要求。

大机组的可靠性主要取决于材料的性能、制造质量和严密的设计，同时也取决于制造者们对某些新问题的解决能力。众所周知，所有的即使是最可靠的制造者，在某些时候仍会面临一些意外的问题，要及时加以解决。

经验证明，发电机中最困难的、起直接影响的是定子高压绕组。发电机的寿命是由绝缘性能决定的，所以环氧树脂为基的绝缘工艺的发展已经有了很大的改进。这种绝缘已成功地

使用了10年。其主要的组成是：

1. 粉云母作主介电层。这种粉云母结构要求树脂很好的浸透，保证它完全均匀，在小的曲率处粘合可靠。这些特性就使得对局部放电具有很高的电阻。
2. 环氧合成和固化树脂的机械和电气性能是经过长期的研究确定的。
3. 玻璃纤维作补强材料，它不会引起热老化。液态树脂能特别结合牢固并保证铜与绝缘要很好粘合。

为了充分控制和彻底保证绝缘处理工艺，每个线棒均应填写控制卡片。对固化周期、试验等应注明期限。每张卡片在现场完成后，还应保存起来，以便供今后线棒损坏时作参考。使用这些材料获得的性能如下：

1. 瞬时介电强度为30千伏/毫米工频有效值。
2. 当电压变化从平均电压的20%到80%时，损失角正切的变化近似等于0.002，无论在额定电压或超过20千伏，扩散系数很低，标志着结构的均匀性。
3. 经过1200周/秒的加速老化寿命试验表明，耐热能力在高达150℃，电压梯度为3.2千伏/毫米，对机械和介电性能均无损害，相当于在频率60赫芝下，运行了84000小时。
4. 热传导率为3400千瓦/℃·厘米。
5. 在热膨胀的周期中绝缘和铜完全粘合。

高质量的绕组也可能由磁路中的故障而遭受机械破坏。因此，完全有必要继续对绝缘进行研究并改进铁芯的制造质量。对老电机，由于铁芯的异常状态而引起的各种问题的研究（由膨胀、松散、振动等引起的变形），就能促使对装压和拉紧采用新的技术。这一方面要对磁路和机座进行改进；另一方面也要对机座和混凝土基础进行改进，以保护磁路，免于以前所出现过的那些问题。这些新技术是：

1. 控制由磁路振动和间断周期性发热引起的拉紧螺杆的伸长，以防止局部松散。
2. 在电厂迭装铁心。这就避免了磁路接缝，使发电机能稳定运行（减少磁噪音）并得到均匀膨胀。这种膨胀减少了定子变形的危险。近十年来，法国已采用了这种方法。
3. 用径向键连接机座与基础板以及机座上机架。这就能保证定子的中心和传递正常的和意外产生的力矩。这种方法允许机座在它的基础板上自由地径向膨胀。这种膨胀是由它本身的发热或由磁路部分引起的径向应力产生的。这种自由膨胀可以消除铁心中的临界纵向载荷，该载荷在极端情况下能引起叠片波浪翘曲，从而产生有害于绕组绝缘的应力。

在一些很高出力的电机中出现过特殊问题，是机座内环形引出线的尺寸。并联支路引出线数量的增加与容量有关，在邱吉尔电站发电机中（50万千瓦）电流约为20000安，有六个并列支路引出线。要特别注意使靠近引出线附近的金属件的损耗减到最小。

机座和磁路部分的机械作用与运行中出现的振动的能量有关，这在大型电机中是更重要的。众所周知，定子各部分都以 $2 \times 50/60$ 赫芝引起不同形式的振动：单纯的径向振动，以及与槽数有关的不同节点的振动，等等。应该避开任何一种可能引起铁心振动的频率或机座部分振动的频率落在 $2 \times 50/60$ 赫芝的范围之内。这是一个复杂的问题。例如：磁路部分，铁芯与机座之间，因机座与混凝土之间的连接强度的弹性模数多数情况下还是一些未知数字。关于转子的设计，增加容量意味着加大尺寸，特别是直径的加大将增大旋转部分的离心力。高屈服点合金钢（85000磅/时²）的供应允许不再采用锻钢作高圆周速度的磁轭。由薄的冲片叠成的磁轭结构，曾用于低速电机中，现已用在50万千瓦伏安，200转/分和20万千

伏安, 375 转/分的电机中。它带来的好处是比以前采用锻钢时, 在其转速范围之内能均匀地冷却电机。

这种磁轭设计的精确理论, 当磁轭和转子支架采用合缝销钉的设计时是复杂的, 表面上看很简单。我们将把这些有意义的问题留给机械设计者, 这里不去深究。

对大容量机组来说, 转子设计中的其它一些机械问题是临界转速计算必须很正确, 并在考虑采用弹性支架。支架应有尽可能大的刚度, 在邱吉尔瀑布电站电机的设计中曾提出的一个难题是在上架架设计中从上导轴承到混凝土基础的异常力的传递。

这些高转矩机组的大轴是由惯用的锻钢制成的。当然也很容易用钢板制成。例如爱尔康塔拉电站发电机 (25.5 万千瓦伏安, 115 转/分) 的大轴外径为 58 吋, 就是用厚度为 8 吋的钢板制成的。

近十多年来, 在大型发电机的设计中, 均采用电子计算机计算。相继通过从技术要求到电磁负荷、效率、阻抗、温升、机械设计、转动部件的应力和各固定部件的重量以及不同构件的寸的设计计算等都编制了计算程序, 对材料、发电机所有大部件的加工费用以及其它全部费用等都可进行估算, 从而获得一个完整的设计。由于采用这些方法, 经过反复的研究计算, 就可能获得优先数据, 以确定最终的设计方案。显然计算机计算结果的好坏仅是与输入有关的。因此, 用最好的技术经济指标编制一个有效的计算程序是非常重要的。

可靠的数据只有对电磁方案进行多方面的认真研究才能获得。特别重要的是弄清楚气流在大型机组中是怎样分布的, 局部的流速和热传导系数等情况如何。为了得到这些数据进行了各种尺寸的旋转模型试验, 热传导系数应用细铜线和发热绕组以及温度记录仪直接在转子和定子的内表面上进行测量。

大型发电机设计中的问题之一是水冷系统, 汽轮发电机的设计者对这种冷却方式已经很熟习。最近苏联、瑞士和瑞典在水轮发电机上也采用了这些冷却系统, 关于采用水冷却的理由将在下面讨论。

技术要求

对汽轮发电机的设计来说, 当定子电压接近 2 万伏, 相应的转子电流密度已达到直接冷却的允许范围已不可能再用过去的冷却方式进行冷却。

对于转速高于或等于 428 转/分, 容量大于 15 万千瓦伏安的高速水轮发电机也可采用水冷却方式。在这种转速时, 磁轭上的通风是很困难的。对输出电压超过 20 千伏的低速运行的容量机组也可采用。

对于所研究的 40~50 万千瓦伏安的机组来说, 根据变压器连接的费用及其全部总损耗一併考虑, 最优的输出电压往往低于 20 千伏。如邱吉尔瀑布电站发电机的电压为 15 千伏。

经济效益

水冷系统可减少单位容量的重量, 用水冷虽然要增添一些辅助设备 (如循环水泵、过滤器等), 对大型机组来说可节约的投资比这些辅助设备所耗的附加费用还要大, 而且冷却效果好。但遗憾的是单位体重的减少使发电机某些电气机械特性变差: 主要是惯性常数 T_a 减少, 瞬变电机 X_d' 增加, 效率稍有降低。这些参数均与机组的动态稳定性有关。要想保持这些参数和发电机的出力取得一致, 就不允许减少与水冷所允许那样多的尺寸。因此经济性稍有降低, 但效率仍然是较高的。

此外, 在采用水冷的特定情况下, 机组转动惯量减小, 机组尺寸缩小时, 高水头混流式

水轮机在过速状态下减少流量，将引起强烈的水锤效应。到今天为止，在我们所研究的所有情况下，基于某些原因，水冷系统在经济上有不利的方面。但是，对装设在接近负荷中心的大型高速发电机来说，有必要采用这种冷却系统，而且很经济，这一点仍然是可能的。

在水泵水轮机电站的发展中，巨型发电机组是有希望的。近十年来可逆式水泵水轮机的发展目前单机已达20万千瓦，也许还要继续增大。可逆式机组的起动是个最有意义的问题。当电网的容量超过机组容量很大时，就可象感应电动机那样使机组在全压下起动，从而使装置简单，节约起动电机和某些辅助设备，并允许转轮带水起动。这样可不用排水装置，还可避免在转子排水时出现的故障。另一方面，阻尼条的散热量是很大的。如20万千瓦，300转/分的发电机所要散发的热量约500千瓦。比较这两个数值可看出阻尼绕组的冷却是很困难的。它几乎不可能用旋转连接的方法通过外部循环水进行冷却。因为在短时起动周期中所需冷却水量是很大的，可能将使外部水泵和水管中的水供应不足而失去平衡。

一种新的解决方法是在转子内装设一个水箱，在同步转速时，这种装置就象一个无活力的旋转质量，但在同步起动中它能借助角加速度突然将水注入阻尼条中，因而不需要任何外加能源。

一种类似于上述型式的装置，已在莱文（Revin）电站的一台比例为1比4的电动发电机样机上进行了一年的试验，并建议在一台20万千瓦，300转/分的机组上装设这种系统。

总之，无论事实如何，近十五年来我们已听到了迫切需要更换冷却方式的反映。因此，在这方面，制造厂家仍然面临着一些新的问题和不断的挑战。

徐思进 译自《Proceeding of the American Power Conference》

1969.Vol.31. PP805—899

邱浩然 校

大型高速水轮 发电机结构和参数的特点

（苏）М.П. Костенко等

转子额定转速300转/分及以上的发电机一般都属于高速发电机。安装在费里修尔电站的容量为3.65万千瓦立式水轮发电机，其转速为1000转/分。已制成的转速在300—600转/分范围的水轮发电机最大功率是10.0—14.0万千瓦（多杰Ⅰ、多杰Ⅱ、凯曼诺和维安登电站）规定功率大于3万千瓦的机组算作大型高速水轮发电机。

随着高水头（250—2000米水头）电站的开发，高速水轮发电机得到了发展。这些高水头电站多位于山区，因此在中欧、北欧、南美和加拿大等地得到广泛应用。国外越来越多地建造蓄能电站。这种电站由人工定期地从下游往上游抽水，以保持高水头。在苏联，高加索、阿尔泰、中亚细亚的河流大部分属于山区河流。目前在苏联建成了一批大型高水头电站，如克拉斯诺斯、姆什克库班——卡拉乌斯克（正在建设中的达捷夫斯克）等电站，其机组

容量在 5.5 万千瓦左右。

50—600 米水头范围，通常采用混流式水轮机，而 450—200 米高水头范围则采用冲击式水轮机。冲击式水轮机可以做成卧式水轮发电机组。

这种冲击式水轮机转轮安装在发电机转子大轴的两端，（图 1 略）。卧式机组的电站厂房示于图 2（略）。卧式机组运行便利；在低负荷情况下，用减少喷嘴数目的办法可使冲击式水轮机得到高效率。在苏联，采用混流式水轮机的最高水头是 290 米（鸠姆什克电站）；瑞士爱雪维斯公司为 Фонней 电站制造了 4.6 万千瓦混流式水轮机，当转速为 750 转/分，水头为 455 米 [1]。

高速水轮发电机结构

大轴的布置对机组结构的选择具有决定性意义。大型机组既可以做成立式的，也可以做成卧式的。立式高速水轮发电机（图 3,4 略）通常做成悬式，推力轴承放置在上机架里，并具有两个导轴承。国外的一些公司，如勃朗鲍维里和英国通用电气公司采用上导轴承与推力轴承合为一体的组合式轴承。从图 2（略）可以看到，当发电机和水轮机采用同一根轴时，第二个导轴承放在水轮机处。

发电机采用具有导向器（喇叭口）的径—轴向密闭通风系统。在立式水轮发电机中，定子机座外圆安装空气冷却器。应当指出，由于高速水轮发电机的转子长度与转子直径之比增大（0.3—1.0），致使保证电机所需风量有一定的困难。

高速发电机的主要的和突出的特点是转子通常都是组合结构。额定转速时，转子的线速度值从 70~100 米/秒，而飞逸时，则达到 200 米/秒。因此，为了保证转子磁轮有高的机械强度，把单个锻造的圆盘装配在转子轮毂上。用法兰将大轴端部连接到轮毂端面上并用螺栓把紧。转子轮毂甚至可以带有公盈套装在轴上。当发电机停机时，为了制动转子，采用专门的圆钢圈。图 4（略）示出了与圆钢圈内外面都相接触的制动环。这种制动环保证有较大的摩擦面。

卧式发电机转子支承在两个座式轴承上，这两个轴承分别安装在两个混凝土支墩上（图 7），轴承用以承受水轮机工作时由于水推力所产生的轴向力。起动时，推力轴承供给压力油。空气冷却器安装在机坑中。发电机的励磁机既可以布置在靠近水轮机转轮处，也可以布置在发电机转子与座式轴承之间。

由于卧式水轮发电机转子体很长（达 10 米），机械应力很大，因此采用组合结构：两个带有法兰的半轴、一个转子轮毂和一个磁轭（后者由约 40 厘米厚的若干高强度钢圆盘组成）。采用这种结构转子易于运输。长转子的圆盘之间要有通风沟，虽然在个别情况下这些沟是不必要的，因空气通过轴向沟仍可进入极间孔。

从图 6（略）可以看出转子支架圆盘独特的固定方式，其半轴拧在中心轴上，同时为了防止径向位移带有止口的磁轭圆盘沿着轴线压入。维安登水电站的大型水轮发电机的转子磁轭（图 7）具有两个热套在空心轮毂上的圆盘。两个半轴借助拉紧螺杆用法兰连接到转子中间轮毂上。圆盘用屈服极限 50 公斤/厘米² 钢制造。每个圆盘重 36.5 吨。飞速转速 770 米/秒，直径 3.75 米的圆盘，其线速度为 177 米/秒。应当指出圆盘式组合转子的造价是相当高的，而且制造也需要很高的生产技能。对于额定转速低于 375 转/分的电机来说，转子磁轭

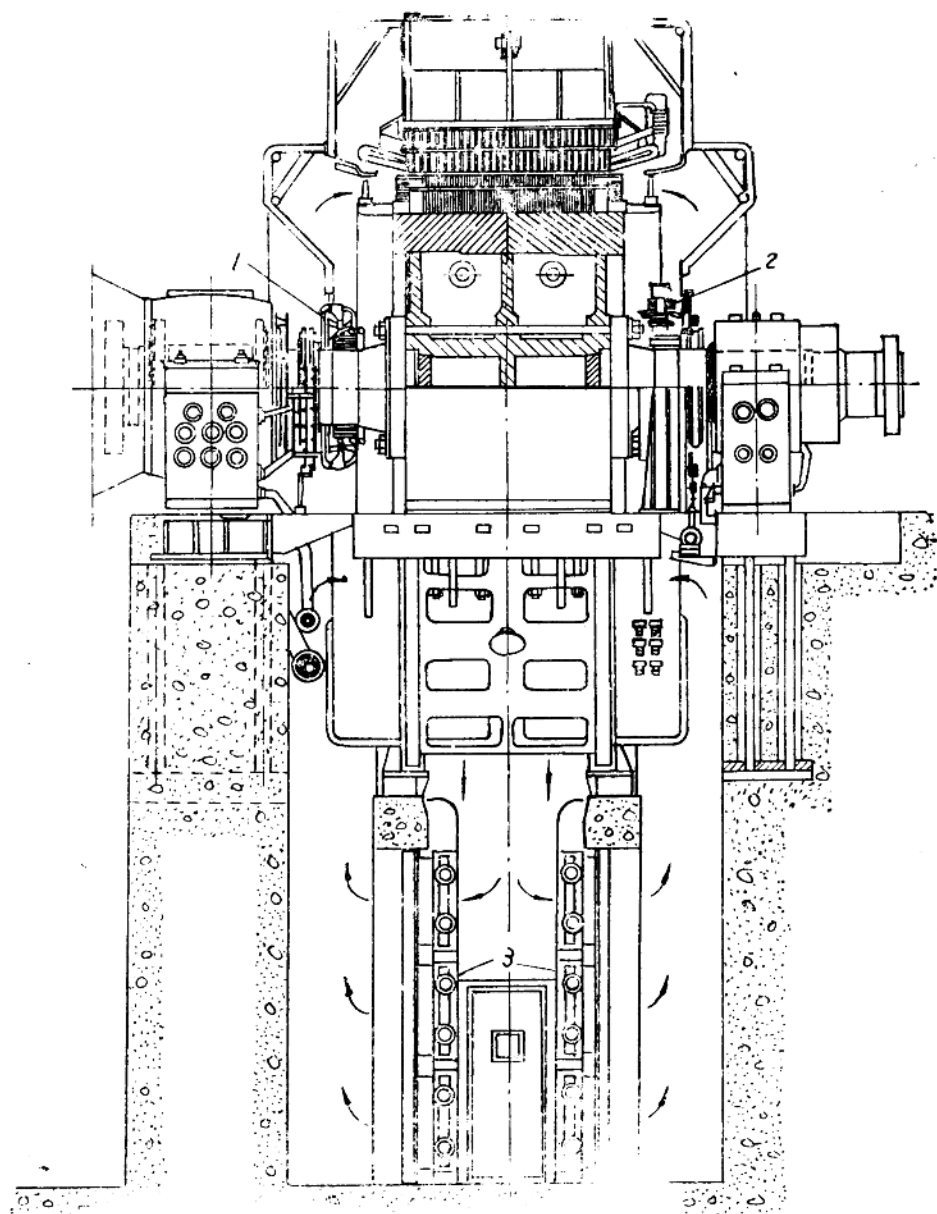


图 7. 维安白电站容量 11.5 万千瓦的水轮发电机在各种转速时的剖面图

1—额定转速 428 转/分时；

2—飞逸转速 770 转/分时。

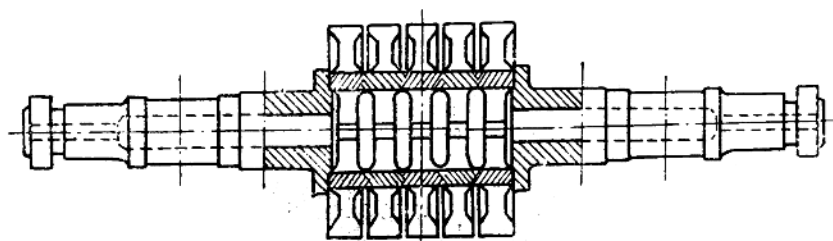


图 8. 玛尔高维尔特电站发电机的具有特殊形状圆盘的组合转子
($P=7.5$ 万千瓦; $n=428$ 转/分; $n_v=770$ 转/分)

通常做成一根轴的叠片磁轭, 这样造价非常低廉。[2]。

1958年, 法国阿尔斯托姆公司曾研制了一种可减轻重量的有益的转子结构(图8)。该结构是靠圆盘端面割一个缺口, 开一个大中心孔(直径一米左右)而减轻了转子重量40吨。转子临界转速为1100转/分。当拧紧通过圆盘和轴法兰的螺杆时, 磁轭圆盘彼此之间以环形磁轭表面接触。选择了14根直径120毫米、内径37毫米的杆。杆用钢的屈服极限为60公斤/毫米², 弹性极限为37公斤/毫米²。

磁极用传统的方法, 即借助T尾槽和两个双向斜键固定到转子磁轭上。但是, 后来所制造的电机中可以看到许多独创的固定方法。这些方法可以减小磁轭上磁极T尾槽的深度, 从而减轻对磁轭强度的削弱。另外, 在转子磁轭很长时, 打入薄而长的键子是很困难的。图

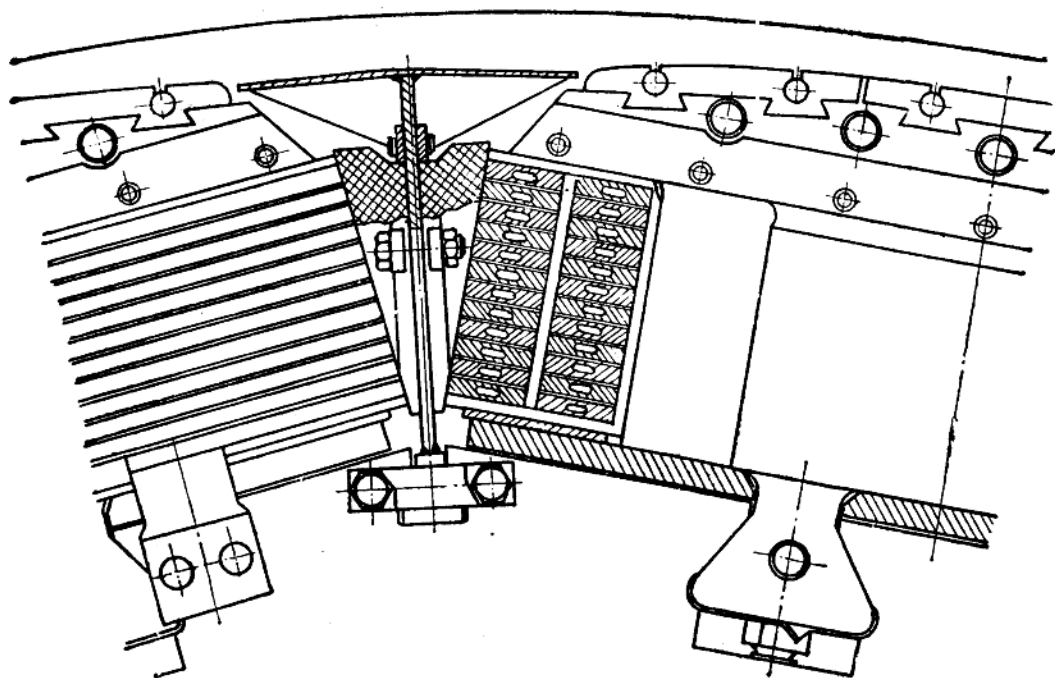


图 9. 赫拉姆电站的立式水轮发电机的磁极在转子磁轭上的固定。

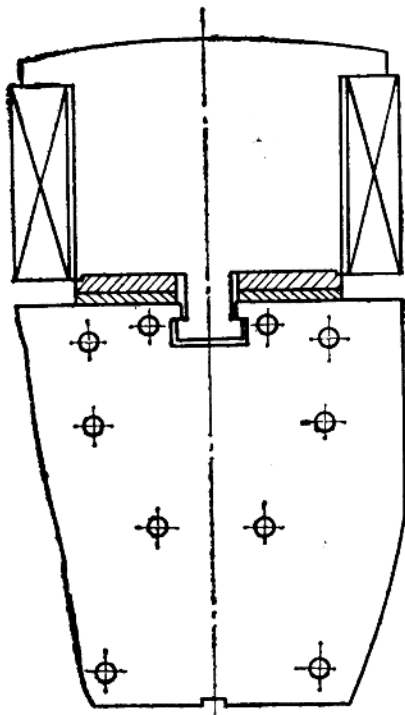


图10. 水冷发电机磁极

由不同宽度的铜排焊在一起的，同时保证铜线表面棱角能良好地散热。为了避免出现离心力而引起的切线分量，磁极铁心和相应的线圈内表面做成具有同样尺寸的梯形。为了限制可能出现的热变形，规定在极间长度方向的中部放置铝合金撑块。高速水轮发电机定子就其结构来说，没有什么原则特点。立式发电机的定子与普通结构的水轮发电机的相类似，而卧式的则与带有座式轴承的汽轮发电机的大致相同。定子机座是焊接结构。虽然速度高，但大功率发电机的定子外形尺寸是比较大的。因此，根据运输条件，不得不将定子做成两瓣。一些公司（勃朗鲍维里和阿尔斯托姆）为了给空气循环提供合理的风道，把卧式发电机的机座制成椭圆形（图12）。支承底脚制成可拆式的。转子在特制的滚架上可以相对自身的轴线翻转 180° ，这样就便于检修线圈〔3〕。定子铁芯采用厚0.5毫米的优质硅钢片叠成，在个别情况下采用0.35毫米的。为使冷却良好，中部铁心段叠得较薄。定子线圈为条形采用每极每相分数槽。只有在高速（750—1000转/分）下 $g \geq 5$ 时，偏重于采用整数。为了减少极间的连线，最好采用波绕组。从1951年开始，国外广泛采用新的热固性绝缘。

为了防止从线棒表面到叠片铁芯发生辉光放电，在槽部的线棒表面涂有导体漆层，而在出槽口过渡到涂半导体漆〔4〕。所有高速电机都是采用空冷系统。目前，布朗鲍维里公司正为保沃那电站设计卧式水轮发电机。该机容量8.6万千瓦，转速428转/分，定、转子线圈直接水冷以及沿压板和定子铁心中固定水管进行水冷〔图13略〕。

图10示出了这台水冷发电机的转磁子极。因为不需要从磁极孔排出空气，所以磁极孔用专门的挡板挡住，这样可以降低转子风磨损耗。

9示出磁极的固定用短T尾并带有打入磁极极身下面的宽键。图10示出了类似用燕尾槽固定的磁极，用特制的螺栓从燕尾下面沿斜面辅助压紧燕尾。图11略示出了容量11.5万千瓦，额定转速500转/分的卧式发电机转子，该发电机磁极采用梳齿形固定。阻尼环用拉杆补充固定到转子磁轭上。

磁极由厚1.5毫米的钢板叠成。磁极压板由屈服极限为32—36公斤/毫米²的锻钢制造。拉紧螺栓是由经过热处理的硅锰铜钢制成。在国外，螺栓用钢的屈服极限已达到55公斤/毫米²。近年来，励磁线圈的制造工艺更加完善。采用靠冲压获得一定形状的端部和铜排直线段装配而成磁极线圈。代替在模子上连续绕制大型电机的磁极线圈。各段之间连接的可靠性由硬焊保证。上述制造方法不限制铜排的选择，允许在同一线圈内用各种截面的线匝。对于高速发电机，作用于线圈上的离心力大的地方，可以采用《硬质》铜材（含银的），也可以靠选择小的横截面来减轻端部线圈，以达到减轻磁极极靴部分负荷的目的等等。例如维安登电站的大型发电机的每匝线圈是

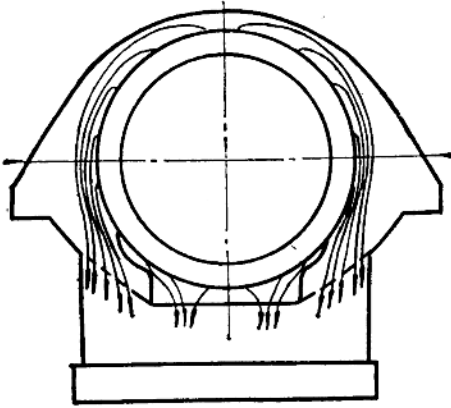


图12. 玛尔高维尔特电站椭圆形水轮发电机的定子

水轮发电机的基本数据与参数

表中列出了已制成的和已设计的部分高速发电机的额定数据, 主要指标和参数。关于这些电机已经作了必要的报导。定子线圈的额定电压为 1.3—16 千伏。正如大家所知道的, 提高电压就增加线圈绝缘的价格, 而降低了电机效率。当发电机不采用升压变压器时 (如地下电站) 提高电压是合理的。飞逸系数 K_y 保持在 1.6—1.4 范围内。电机容量是与 $1/K_y^2$ 成比例的。因此, 在降低 K_y 同时, 提高单机容量的问题就容易了。在现行的苏联国家标准中规定了冲击式和混流式水轮机组飞逸转速系数不低于 1.75。蓄能电站可逆式水轮发电机组 K_y 采用较低的值 (如克鲁阿汗电站)。这取决于保证机组在泵状

态下安全运行需要而提高转动惯量的要求。

高速水轮发电机的惯性时间常数通常在 5—7 秒范围内。其值与水轮机导水机构的关闭时间 T_h 有关, 与机组甩负荷时所容许的转速上升值 Δn 有关 [6]

$$\frac{\Delta n}{n_H} = \sqrt{\frac{T_h}{H_g}} + 1 \leq 1.3 - 1.4,$$

$$\text{或者一次近似值 } \frac{T_h}{H_g} \approx 0.7 - 1.$$

大家知道, 在频率 50 赫时, 转子线速度 (米/秒) 等于极矩 (厘米)。从表中得出结论, 维安登电站的发电机在飞逸转速下转子的线速度 v_{ty} 达 176 米/秒。

空冷高速水轮发电机的电机常数为 $(14-19) \cdot 10^4$, 而转子和定子线圈水冷式水轮发电机 C 降到 9.7×10^4 (保沃那电站)。在额定负载下, 效率降低不大的情况下, 采用直接水冷可使发电机重量减轻 40~45%, 按参考文献 7 的技术经济分析得出如下的结论: 给定转动惯量的大容量高转速的水轮发电机采用水冷是合理的。

(参考文献从略)

王秀慧 译自《大型电机电磁场、参数和损耗的研究》苏联科学院和电工部机电研究所编, 苏联《科学》出版社, 莫斯科。

列宁格勒, 1966, 11—12 页

翟玉萍 校

*表中所示保沃那电站发电机的参数为估算值, 因为这些值是由示波图换算来的, 而示波图的比例又是根据玛尔高维尔特电站水轮发电机的剖面图来确定的。

用水流模拟法 分析大型旋转电机的通风

(日) 渡部正敏 等

1. 前言

近年来, 旋转电机的通风分析在大型水轮发电机中, 是把通风损耗的计算及温升作为主要问题。可是, 由于通风与通风损耗问题取决于电机内冷却气体的复杂流动状况, 所以在构成新风路时, 仅局限于理论上的分析是缺乏可靠性的, 最后还必须用试验方法验证。

对于试验分析方法, 虽然已有用局部风道模拟的试验方法, 但是假如从电机整体通风状况与通风损耗进行定量分析的观点出发, 要用电机的整体模型进行真实的运转试验的方法是非常有效的。用整体模型试验, 对大型机组来说, 从技术和经济理论出发, 通常是采用缩小尺寸的模型。而且, 与以往在空气中采用的整体模型试验方法相比, 模型的尺寸缩小比例增大了, 为了与真机进行等效分析(如下所述), 模型转速必须比真机转速提高很多。因此, 对于不得不把大型电机的尺寸缩小比例加大来作为分析对象时, 就需要制造机械强度大、运行十分平稳的模型, 因而存在对装置制造的检验要花费时间的缺点。

这里, 笔者介绍用尺寸缩小的模型在水中进行试验的方法来分析大型旋转电机的通风。这种方法从1967年就开始研究了。其结果是, 用这种方法可以把尺寸缩小的比例取得相当大, 用转速低的模型, 就可以进行与真机等效的试验和分析, 并确认其可靠性也很高。

现在把这种方法称为“水流模拟法”, 它是大容量水轮发电机通风分析的创举, 也是新型通风方法研究发展在应用中所取得的成果。下面叙述这种方法的概况、试验装置的组成和分析实例。

2. 水流模拟法概述

2.1 运动流体的相似定律

欲使以某一缩尺比例制造的模型与真机流体流量相似时, 两者的雷诺数(简写为 Re)相等即可。但是这要限于两种流体的非压缩性和任何位置的温度相同的假定情况下。水流模拟均满足上述假设; 在真机中, 由于风压不高, 温差也不很大, 所以也可以认为是满足上述假设。这样, 模型与真机的相似条件为:

$$Re = \frac{V_m \cdot D_m}{\gamma_m} = \frac{V_d D_d}{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

V —速度(米/秒)

D—转子外径 (米)

γ —动态粘度系数

大写字母右下角附有 m 字母表示模型, 附有 d 的表示真机。

由于 R_e 数为惯性力与粘滞力之比, 当 (1) 式成立时, 模型与真机中流体的主流及边介层以内的流动是相似的。在 (1) 式中, 假如把速度 V 视为转子的圆周速度, 把尺寸 D 看作转子外径, 而尺寸缩小的比例倒数为 δ , 旋转速度为 n , 则为进行与真机完全相似的试验所要求的模型转速 n_m 与真机的转速 n_d 的关系可用下式表示:

$$n_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_d} \cdot \delta^2 \cdot n_d \text{ (转/分)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: δ 为尺寸缩小比例倒数 (以下简称缩尺) $= D_d/D_m$

公式中, 把模型与真机放在同一种流体中试验 ($\gamma_m = \gamma_d$) 时, 有必要使模型的旋转速度 n_m 大于 n_d , 与缩尺 δ 的平方成比例, 另一面, 在比真机中运动流体的动态粘度系数小的流体中进行模拟试验时, 也可以理解为把模型转速相对地降低。因此, 把比空气动态粘度系数 $1/15 \sim 1/12$ (随温度不同而异) 小的水作为模型工作流体的方法, 就是水流模拟法。用水作为工作流体, 不仅模型的相似旋转速度可大大降低, 而且这种方法还有如下所述的优点, 它比用其它流体都经济。

对于模型与真机的相似条件公式 (2) 的成立, 一方面是假设它的速度 V 、压差 ΔH 、流量 Q 和损耗 Z 可以测定, 另一方面它的值可以由下式求得。

$$\text{即 } V_m = \frac{n_m}{n_d} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot V_d \text{ (米/秒)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta H_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_d} \cdot \left(\frac{n_m}{n_d} \right)^2 \cdot \frac{1}{\delta^3} \cdot \Delta H_d \text{ (毫米水柱)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中, γ : 比重 (公斤/米³)

$$Q = \frac{n_m}{n_d} \cdot \frac{1}{\delta^3} \cdot Q_d \text{ (米}^3\text{/秒)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z = \frac{\gamma}{\gamma_d} \cdot \left(\frac{n_m}{n_d} \right)^3 \cdot \frac{1}{\delta^5} \cdot Z_d \text{ (千瓦)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

在模型的设计中, 公式 (3) — (6), 可以用作模型驱动装置的规格与范围的确定计算公式及由模型测量结果来计算真机特性的换算公式。

2.2 空气模拟与水流模拟

进行缩尺模型试验时, 在水中的试验方法 (水流模拟法) 比在空气中的试验方法 (空气模拟法) 适宜。作为实例, 制作了容量 10 万千伏安、转速 277 转/分的立式水轮发电机通风分析的模型装置, 其规格和采用上述两种方法用 (1) — (6) 式算出的结果示于表 1。

而且, 在计算时, 要用下面的条件。

(1) 用以往的设计计算公式计算的结果, 真机的风量为 100 米³/秒、通风损耗为 500 千瓦、最高风压为 100 毫米水柱。